



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

**CARACTERIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE
ULTRASONIDO DE UN LAMINADO DE FIBRA DE
VIDRIO**

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

**Autor: D. JORGE VALENCIA ILARREGUI
INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL (MECÁNICO)**

**Tutora: DÑA. BRENDA BUITRAGO PÉREZ
Dpto. de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras.**

Julio de 2009

DEDICATORIA

A mis padres y hermano, por su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mi agradecimiento a mi tutora, Brenda Buitrago, por su dedicación y por haberme prestado gran parte de su tiempo para desarrollar este trabajo. La realización de este proyecto ha sido posible gracias a sus consejos y conocimientos.

A mi familia, que siempre ha confiado en mí y me ha apoyado en los momentos difíciles de mi carrera.

Por último a mis amigos y compañeros de clase, también siempre presentes en los momentos duros y mostrándome en todo momento el lado positivo de las cosas.

En definitiva, a todas aquellas personas que me han mostrado su apoyo y han confiado en mí a lo largo de estos años.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
INDICE GENERAL	IV
INDICE DE FIGURAS	VII
1. INTRODUCCION	9
1.1 Motivación	9
1.2 Objetivos	11
2. MARCO TEORICO	13
2.1 Inspección no destructiva	13
2.1.1 Aplicaciones de los E.N.D	15
2.2 Inspección por ultrasonido	16
2.2.1 Transductor ultrasónico	17
2.2.2 Naturaleza del ultrasonido	20
2.2.3 Frecuencia	20
2.3 Velocidad de propagación de ondas ultrasónicas y atenuación	22
2.3.1 Refracción, reflexión e interferencias	24
2.3.2 Atenuación	25
2.3.3 Notación para la atenuación y amplificación de las señales	28
2.3.4 Impedancia acústica	29

2.4	Material	29
2.4.1	Fibra de vidrio	29
2.4.2	Propiedades del vidrio	31
2.4.3	Matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio	33
2.4.4	Inspección ultrasónica de materiales compuestos	34
2.5	Aplicaciones de los materiales compuestos de fibra de vidrio	35
3.	ANTECEDENTES	40
3.1	Ultrasonido	40
3.2	Aplicaciones del ultrasonido en materiales compuestos	41
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	52
4.1	Material	52
4.2	Probeta	52
4.3	Equipos	53
4.3.1	Equipo de ultrasonido USD 10	53
4.3.1.1	Descripción del equipo	54
4.3.2	Transductores ultrasónicos	55
4.3.3	Medio acoplante	56
4.3.4	Osciloscopio	57
4.4	Procedimiento de caracterización	58
4.4.1	Medida de la velocidad de la onda longitudinal	58
4.4.1.1	Procedimiento	60
4.4.2	Procedimiento para la medición de la atenuación ultrasónica	65
4.4.3	Método de comprobación del procedimiento	66

4.4.4	Caracterización asistida con el equipo de ultrasonido USD 10 y el osciloscopio	67
5.	RESULTADOS	70
5.1	Medición de la velocidad ultrasónica longitudinal	70
5.1.1	Cálculo teórico de la velocidad de propagación de la onda longitudinal	74
5.1.1.1	Error experimental	75
5.2	Cálculo de las longitudes de onda características	75
5.3	Medición de la atenuación	77
5.3.1	Transductor A	79
5.3.2	Transductor B	80
5.3.3	Transductor C	82
5.3.4	Transductor D	84
5.4	Señales obtenidas del osciloscopio	86
5.4.1	Transductor A	86
5.4.2	Transductor B	87
5.4.3	Transductor C	88
5.4.4	Transductor D	89
6.	CONCLUSIONES	91
7.	TRABAJOS FUTUROS	93
8.	BIBLIOGRAFIA	94

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Evolución de los materiales compuestos en aeronáutica	10
Figura 2.1 Concepto de la técnica ultrasónica pulso –eco	17
Figura 2.2 Zonas del haz ultrasónico	18
Figura 2.3 Zona muerta del haz ultrasónico	19
Figura 2.4 Atenuación de la señal ultrasónica	26
Figura 2.5 Aeronave AZOR	36
Figura 2.6 Materiales empleados en la construcción del Eurofighter Typhoon	37
Figura 2.7 Tanque subterráneo fabricado en fibra de vidrio con resina de poliéster	38
Figura 2.8 Revestimiento del techo en el túnel de metro de Madrid	39
Figura 3.1 Laminado multi-capas	44
Figura 3.2 Esquema del material y sus módulos elásticos	45
Figura 4.1 Esquema de la probeta inspeccionada	53
Figura 4.2 Equipo ultrasónico Krautkramer Branson USD 10	54
Figura 4.3 Transductores utilizados	56
Figura 4.4 Medio acoplante	56
Figura 4.5 Osciloscopio	57
Figura 4.6 Esquema del método de medida de constantes elásticas mediante ultrasonidos	58
Figura 4.7 Esquema del recorrido de la onda a través del espesor de la muestra	60
Figura 4.8 Reflexiones debidas al transductor y al eco de pared de fondo	61
Figura 4.9 Probeta lista para inspeccionar	62

Figura 4.10	Conector BNC	62
Figura 4.11	Proceso de inspección	63
Figura 4.12	Aplicación de líquido acoplante	64
Figura 4.13	Sistema de referencia indicativo de la atenuación de la señal	66
Figura 4.14	Bloque de aluminio	67
Figura 4.15	Conector BNC en T	67
Figura 4.16	Procedimiento de inspección con el USD 10 y el osciloscopio	68
Figura 4.17	Esquema del procedimiento y la conexión de los equipos	69
Figura 5.1	Curva de velocidad	71
Figura 5.2	Ensayo a tracción de un laminado de fibra de vidrio y matriz de poliéster	73
Figura 5.3	Relación entre la longitud de onda y la detección de obstáculos	77
Figura 5.4	Señal registrada para el transductor A	79
Figura 5.5	Esquema de la señal registrada para el transductor A	80
Figura 5.6	Señal registrada para el transductor B	81
Figura 5.7	Esquema de la señal registrada para el transductor B	82
Figura 5.8	Señal registrada para el transductor C	83
Figura 5.9	Esquema de la señal registrada para el transductor C	83
Figura 5.10	Señal registrada para el transductor D	85
Figura 5.11	Esquema de la señal registrada para el transductor D	85
Figura 5.12	Señal obtenida en el osciloscopio para el transductor A	87
Figura 5.13	Señal obtenida en el osciloscopio para el transductor B	88
Figura 5.14	Señal obtenida en el osciloscopio para el transductor C	89
Figura 5.15	Señal obtenida en el osciloscopio para el transductor D	90

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACION

Los materiales compuestos tuvieron su origen a principios de los años 60 en los grandes proyectos aeroespaciales y de defensa en Estados Unidos y Europa. A partir de entonces, el campo ha avanzado notablemente. Durante las últimas décadas los materiales compuestos han empezado a sustituir a los materiales empleados tradicionalmente tales como metales, aleaciones, madera o cerámicas. Esto es debido a dos ventajas clave de los materiales compuestos frente a los materiales tradicionales: su mayor ligereza y mejor resistencia. La reducción del peso es muy importante, sobre todo en la industria del transporte, ya que al reducir el peso en las partes móviles se incrementa el desempeño y se ahorra energía.

Como ejemplo de este auge de los materiales compuestos, y de cómo han ido sustituyendo a los materiales tradicionales, en el diagrama de la Figura 1.1 se observa el gran crecimiento de la utilización de materiales compuestos en el sector aeronáutico desde el año 1980 hasta la actualidad.

En la actualidad, la gran demanda de nuevas tecnologías ha dado lugar a que los actuales procesos de fabricación requieran de nuevos materiales, ya sea en busca de una reducción de costos, una optimización en el funcionamiento de los productos o una mejora de las propiedades del material.

Con la demanda y aplicación de nuevos materiales, es necesario también el desarrollo de nuevos procesos de inspección y esto trae consigo ampliar el conocimiento del comportamiento de tales materiales en diferentes circunstancias de servicio.

La complejidad de los materiales compuestos, así como el auge experimentado en su utilización, hace necesario profundizar en el estudio y el desarrollo de nuevos métodos de ensayos no destructivos.

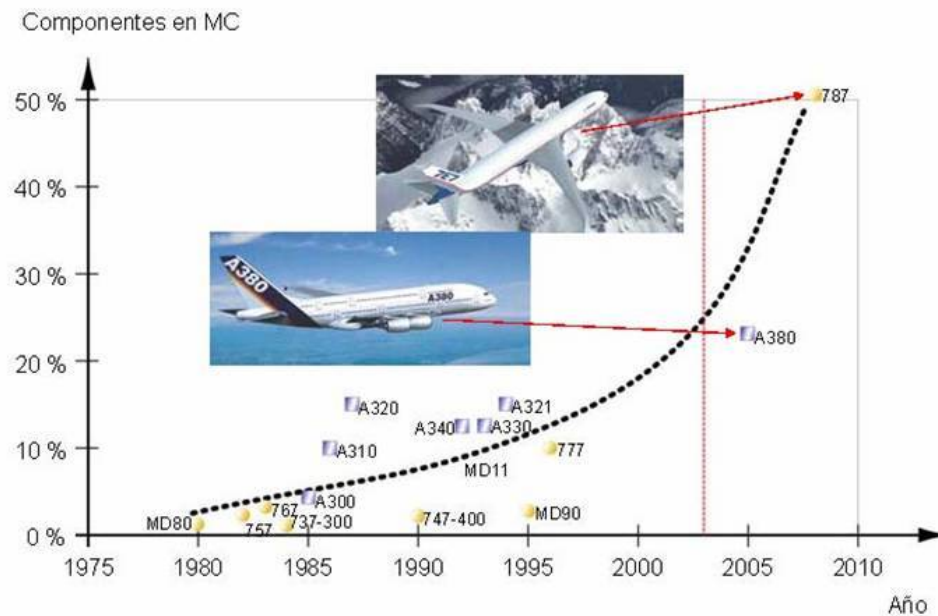


Figura 1.1. Evolución de los materiales compuestos en aeronáutica [11]

Un aspecto muy importante es caracterizar la velocidad del sonido en el material. Este parámetro facilita mucho el procedimiento de inspección de un material compuesto mediante ultrasonido, ya que es importante conocer la velocidad del sonido para poder determinar la posición de los defectos en el interior del material. Además la velocidad ultrasónica ha sido ampliamente utilizada para determinar propiedades importantes del material, como el módulo elástico.

Los métodos no destructivos juegan un papel importante en la caracterización de los materiales compuestos y en la evaluación de su calidad y comportamiento en las estructuras. En el amplio rango de los diferentes métodos no destructivos, el método de inspección por ultrasonido es el más utilizado en la actualidad. Las medidas tomadas con ultrasonido son precisas, confiables y repetibles.

Se obtienen lecturas digitales instantáneas mediante la transmisión del sonido desde un solo lado del material, no requiriéndose, por lo tanto, cortar o destruir las piezas en aquellas situaciones en las que el lado opuesto es de difícil acceso o en las que los micrómetros u otras herramientas de inspección no puedan realizar la medición.

El ensayo ultrasónico es usado generalmente en la industria para controles de calidad y estudios de integridad de materiales. Se usa sobre todo para la detección de errores y medición de espesor de paredes. Sin embargo el ultrasonido puede ser usado también para determinar propiedades físicas de un material y posibles diferencias en su estructura. Un tratamiento de calor, el tamaño de grano, y el modulo de Young pueden afectar la atenuación del ultrasonido.

El estudio de materiales homogéneos e isotrópos mediante la técnica ultrasónica resulta relativamente sencillo, ya que los materiales tienen definidas sus propiedades características como velocidad del sonido, módulo elástico, densidad, etc. Sin embargo si el objeto no está constituido por un solo material homogéneo, como es el caso de los materiales compuestos, el sonido puede propagarse a diferentes velocidades en diferentes partes de del objeto. Las propiedades elásticas de los componentes que integran el material son diferentes y están situadas aleatoriamente en el material.

Sin embargo, a pesar de estas dificultades para su inspección, los materiales compuestos aportan unas ventajas tales que hacen que su uso siga en aumento. Es por ello que se hace necesario estos estudios de caracterización de materiales compuestos para una mejor comprensión de su comportamiento y una determinación fiable de sus propiedades más importantes.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es la caracterización ultrasónica de una placa de material compuesto, constituido de fibra de vidrio reforzado con matriz de poliéster, la cual consiste en determinar la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el espesor del material.

Para alcanzar este objetivo es necesario:

- ☐ Evaluar la eficacia de utilizar la técnica ultrasónica para la inspección de un laminado grueso de fibra de vidrio y matriz polimérica.
- ☐ Evaluar las técnicas disponibles para estimar la velocidad de propagación de la onda ultrasónica en el material y estudiar las posibles variaciones.
- ☐ Evaluar la dependencia entre la velocidad de la onda y la frecuencia utilizada para inspeccionar el material
- ☐ Estudiar el efecto de la atenuación en el material.
- ☐ Determinar la frecuencia óptima para la inspección de dicho material.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 INSPECCION NO DESTRUCTIVA

Los Ensayos No Destructivos (END), agrupan una diversidad de métodos que permiten obtener una información muy amplia sobre las propiedades, estructura, presencia de discontinuidades y dimensiones de un material o de una pieza, sin alterar sus condiciones de servicio [8]. Las técnicas de evaluación no destructiva, pueden ser aplicadas para:

- Análisis dimensional de piezas.
- Detección, identificación y dimensionamiento de discontinuidades.
- Caracterización de materiales.
- Control de calidad de procesos industriales y de fabricación de materiales.
- Evaluación de la condición de un componente para determinar su continuidad en servicio.

Basándose en los requerimientos específicos de las diversas aplicaciones que tienen los ensayos no destructivos, se han desarrollado diversos métodos, los cuales pueden ser agrupados desde varios puntos de vista. Una de las clasificaciones más aceptadas se basa en la complejidad y facilidad de empleo de los ensayos no destructivos;

Esta clasificación es:

- Ensayos no destructivos convencionales: Inspección visual, líquidos penetrantes, ensayo de fuga, partículas magnéticas, corrientes inducidas, radiografía industrial, gammagrafía y ultrasonido.
- Ensayos no destructivos no convencionales: Ensayo de vibraciones, emisión acústica, radiografía por neutrones, holografía óptica, holografía acústica y tomografía industrial.

Los métodos de ensayo no destructivo son complementarios entre sí, por lo que no existe un solo método que, para una aplicación específica, reúna toda la información requerida. Esta afirmación es aplicable principalmente en el caso de los estudios de defectología.

Los ensayos no-destructivos se basan en la medición de las propiedades de los materiales, y en el caso de los ultrasonidos lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Las propiedades que se miden son de diferente índole y van desde la ecogenicidad (capacidad de producir ecos) para formar imágenes hasta la determinación de constantes elásticas, a veces mediante el estudio de modos de propagación complejos. [9].

Sin embargo, las técnicas de inspección no destructiva tienen las siguientes limitaciones:

- En algunos casos se requiere una inversión inicial bastante alta, aunque se puede justificar si se analiza correctamente la relación coste-beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas.
- La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación. Esto se puede evitar si se preparan patrones de referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección.

- Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente o no se cuente con patrones de calibración adecuados.
- Aunque las pruebas son fáciles de realizar, se requiere que el personal encargado de ello esté debidamente capacitado y cualificado. Además deberá contar con la experiencia necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados, evitando el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo.

2.1.1 Aplicaciones de los E.N.D

En síntesis el campo de utilización de las técnicas de ultrasonidos se extiende, a todos aquellos ámbitos de la actividad industrial en los que la calidad de los productos o la seguridad de estructuras, instalaciones o personas están implicadas.

Así, son clásicas las aplicaciones en aeronáutica (revisión en producción y periódica de estructuras aerodinámicas, motores, etc.), centrales nucleares (revisión de elementos críticos, soldaduras, etc.), transporte (en especial ferroviario, detección de grietas en ruedas, uniones soldadas, etc.), prospección y distribución del petróleo (oleoductos, columnas de perforación, etc.), industria química (tuberías, válvulas, reactores, etc.), siderúrgica (control de calidad de planchas, perfiles, etc.), naval (inspección de estructuras), aeroespacial y todas aquellas en las que se requiera un alto grado de fiabilidad, un seguimiento de defectos críticos o una detección prematura de causas de rotura o avería como consecuencia de la corrosión, fatiga mecánica u otras. En el campo de la Automoción, las inspecciones por ultrasonidos son muy valiosas, pudiéndose aplicar en todo tipo de elementos mecánicos (control de calidad en ejes, pernos, etc.), detectar oclusiones, defectos de fabricación, aparición de grietas, revisión en continuo de puntos de soldadura, etc.

En la construcción también puede ser interesante el estudio mediante ultrasonidos del fraguado del hormigón, pudiendo sustituir a los ensayos destructivos que se realizan en la actualidad.

2.2 INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO

Las investigaciones realizadas sobre la utilización del sonido para la detección de heterogeneidades, se basaron en la medición de la caída de la intensidad acústica del haz ultrasónico cuando éste atraviesa zonas del material con presencia de discontinuidades. Las mismas fueron desarrolladas y aplicadas por Sokolov, en el año de 1929.

En 1942, Firestone fue el primero en aplicar el principio del sonar, para la localización de buques y medir profundidades marinas, así como la detección de heterogeneidades en los materiales mediante una señal reflejada. A partir de 1945, el ensayo por ultrasonido tuvo una aceptación general, favorecida además por la urgente demanda de ensayos no destructivos.

En años recientes los avances en la instrumentación y la tecnología electrónica, han suplido las herramientas necesarias para hacer posible el desarrollo de este método, como una herramienta rápida y confiable en el aseguramiento y control de la calidad.

Los métodos de ultrasonido utilizan haces de ondas de sonido (vibraciones) de longitud de onda corta y alta frecuencia que se transmiten desde una sonda y son detectados por la misma sonda u otras. La pantalla de un osciloscopio con una base de tiempo muestra el tiempo que tarda en viajar un impulso ultrasónico a un reflector (una falla, la superficie trasera u otra superficie libre). La altura del impulso reflejado se relaciona con el tamaño de la falla, tal como se ve desde la sonda del transmisor

Es una técnica en la cual pulsos de alta frecuencia traspasan al material inspeccionado con el fin de detectar discontinuidades superficiales, subsuperficiales e internas, tal como aparece en la Figura 2.1. Las ondas sónicas comúnmente empleadas en las inspecciones tienen frecuencias que oscilan entre los 0,1 y 25 MHz [10].

2.2.1 Transductor ultrasónico

Para poder realizar este tipo de inspección, es necesario un transductor ultrasónico, que es un mecanismo construido con un cristal de espesor determinado. Su función es convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La conversión de esta energía se da por dos efectos: efecto piezoeléctrico (propiedad que tienen algunos cristales, como el cuarzo, de convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa) y efecto magnetostrictivo.

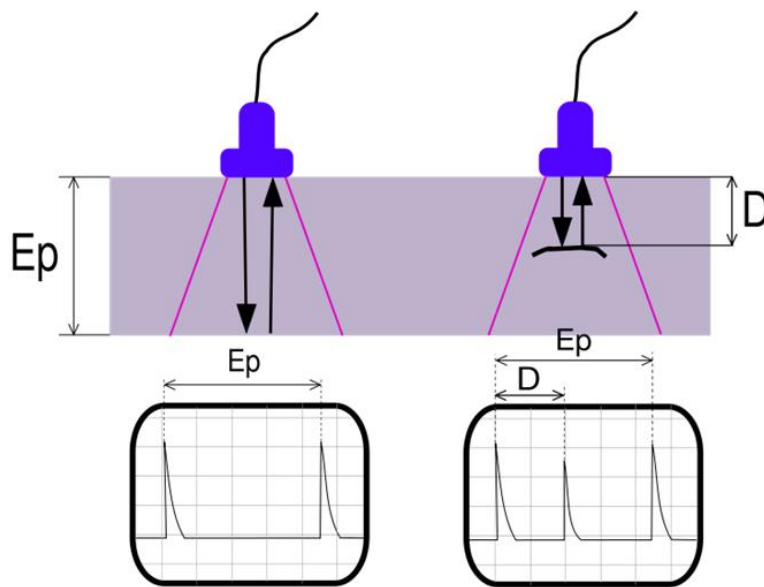


Figura 2.1 Concepto de la técnica ultrasónica pulso-eco [30]

El haz ultrasónico generado por un transductor en forma de disco, es similar a un haz de luz, el cual es propagado en forma de cono. Generalmente este haz se considera constante en toda su longitud, pero al medir las intensidades a lo largo de éste podemos distinguir tres zonas, tal como se aprecia en la Figura 2.2

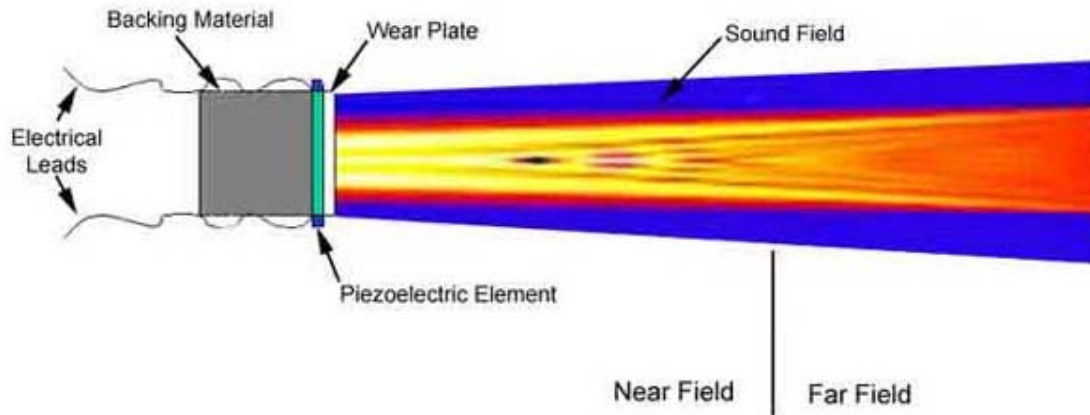


Figura 2.2. Zonas del haz ultrasónico.

Zona muerta: En esta zona se produce una interferencia por el cristal palpador por lo que cualquier discontinuidad cercana a ésta zona no será detectada.

Zona de campo cercano: En esta zona están las variaciones que presenta el haz ultrasónico debido a los máximos y mínimos que presenta la presión acústica.

La distancia del campo cercano está relacionada con el diámetro del transductor y con la longitud de onda del haz ultrasónico a través de la siguiente fórmula (1):

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (1)$$

Donde,

N = Longitud del campo cercano

D = Diámetro del palpador (mm)

λ = Longitud de onda (mm)

Zona de campo lejano: En esta zona, la intensidad o presión acústica se estabiliza, teniendo mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, y va disminuyendo hacia los límites del mismo.

Esto es debido a la divergencia del haz, lo que genera la dispersión de la presión acústica.

Debido a la zona muerta, se produce siempre el primer pico debido a la superficie de la muestra, tal como se muestra en la Figura 2.3.

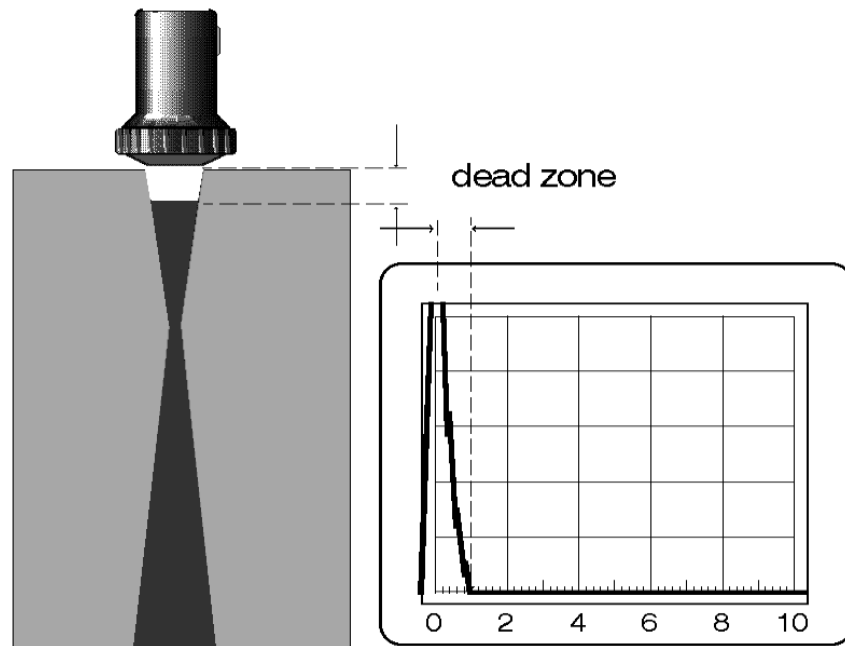


Figura 2.3. Zona muerta del haz ultrasónico [31]

La divergencia del haz depende de la frecuencia, del diámetro del transductor y de la velocidad del medio. Estas variables se relacionan mediante la siguiente ecuación (2):

$$\sin \phi = \frac{1,22 c}{D f} \quad (2)$$

Donde

ϕ = La mitad del ángulo de divergencia

D = Diámetro del transductor (mm)

f = Frecuencia (Hz)

c = velocidad acústica (m/s)

2.2.2 Naturaleza del ultrasonido

Las ondas ultrasónicas son ondas acústicas de idéntica naturaleza (mecánica o elástica) que las ondas sónicas, caracterizándose en que operan a frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico. No hay que confundirla con la supersónica, que trata de los fenómenos asociados al movimiento de un objeto sólido a velocidades superiores a la del sonido [10].

Infrasónica: $f < 16 \text{ Hz}$

Sónica (audible): $16 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$

Ultrasónica: $f > 20 \text{ kHz}$

2.2.3 Frecuencia

La frecuencia de una onda de sonido es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado. Para calcular la frecuencia de un evento, se contabilizan un número de ocurrencias de éste teniendo en cuenta un intervalo temporal, luego estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido.

Según el Sistema Internacional, el resultado se mide en hertz (Hz), en honor a Heinrich Rudolf Hertz. Un hertz es aquel suceso o fenómeno repetido una vez por segundo, 2 Hz son dos sucesos (períodos) por segundo, etc.

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$$

Un método alternativo para calcular la frecuencia es medir el tiempo entre dos repeticiones (periodo) y luego calcular la frecuencia (f) recíproca de esta manera mediante la ecuación (3), donde T es el período de la señal:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

En teoría cualquier frecuencia alrededor de 20000 ciclos por segundo (20 kHz) puede ser considerada una frecuencia ultrasónica o frecuencia sobre el rango de sonido normal. En la práctica, el equipo y los transductores ultrasónicos operan en un rango de frecuencias de 50 kHz a 200 MHz. Este rango de frecuencia se extiende mas allá del rango de frecuencia audible (generalmente de 20 Hz a 20 kHz), pero las ondas ultrasónicas aun se siguen propagando como ondas de vibraciones de partículas. Estas ondas viajan con facilidad en sólidos uniformes y en líquidos de baja viscosidad. Vacíos o gases como aire, las atenúan rápidamente.

La relación entre la frecuencia (f), longitud de onda (λ) y velocidad (v) viene dada por la ecuación (4).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (4)$$

De esta ecuación se puede deducir que la velocidad es directamente proporcional a la longitud de onda y a la frecuencia. Y la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia y viceversa.

La velocidad es la rapidez a la cual las vibraciones ultrasónicas pasan a través de los materiales. Depende de las propiedades elásticas del material y del modo de vibración.

En la práctica, la frecuencia seleccionada para la inspección depende de la sensibilidad y penetración del sonido requeridas. En general, cristales de alta frecuencia son más sensibles a las discontinuidades y los cristales de baja frecuencia proporcionan más profundidad de penetración. Todas las frecuencias trabajan por igual en materiales de grano fino. Normalmente las altas frecuencias no se usan para inspeccionar materiales de grano grueso porque el material tiende a dispersar la energía. Las frecuencias superiores a 10 MHz raramente se usan con transductores de contacto debido a la frágil naturaleza de los cristales de alta frecuencia [13].

2.3 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE ONDAS ULTRASONICAS Y ATENUACION

Las ondas ultrasónicas se propagan en un medio homogéneo a una velocidad y atenuación que son características para cada material. De esta forma las dos propiedades pueden ser empleadas para establecer la existencia de defectos en su interior. La determinación de estos parámetros, que pueden ser considerados básicos y elementales, debe hacerse cuidadosamente, razón por la cual en su medición deben ser consideradas numerosas fuentes de error, tan significativas que ocultan algunas veces las magnitudes de interés, restando validez al método de medición y sus resultados [9].

Para medios homogéneos, las técnicas de medición de velocidad de propagación deben cuidar principalmente la precisión que es posible alcanzar como resultado de los errores asociados a la determinación de las distancias de propagación (camino acústico) y el tiempo empleado en recorrer la distancia asociada (tiempo de vuelo). La situación es diferente cuando el medio es no-homogéneo, ya que en este caso se presenta el fenómeno de la dispersión y debe distinguirse la velocidad de propagación que el medio presenta para cada frecuencia, conocida como velocidad de fase, de la velocidad con que se propaga un grupo de ondas, llamada también velocidad de grupo [9].

La velocidad de propagación del sonido en aire seco a una temperatura de 0 °C es de 331,6 m/s. Al aumentar la temperatura aumenta la velocidad del sonido; por ejemplo, a 20 °C, la velocidad es de 344 m/s. Los cambios de presión a densidad constante no tienen prácticamente ningún efecto sobre la velocidad del sonido. En muchos otros gases, la velocidad sólo depende de su densidad. Si las moléculas son pesadas, se mueven con más dificultad, y el sonido avanza más despacio por el medio. Por ejemplo, el sonido avanza ligeramente más deprisa en aire húmedo que en aire seco, porque el primero contiene un número mayor de moléculas más ligeras. Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

Tanto en los líquidos como en los sólidos, la densidad tiene el mismo efecto que en los gases; la velocidad del sonido varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. La velocidad también varía de forma proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad. Por ejemplo, la velocidad del sonido en agua es de unos 1.500 m/s a temperaturas ordinarias, pero aumenta mucho cuando sube la temperatura. La velocidad del sonido en el cobre es de unos 3.500 m/s a temperaturas normales y decrece a medida que aumenta la temperatura (debido a la disminución de la elasticidad). En el acero, más elástico, el sonido se desplaza a unos 5.000 m/s; su propagación es muy eficiente [26].

Existe otro factor que también afecta a la velocidad que es el coeficiente de Poisson. Cuando sobre un metal se aplica una tracción, se produce un alargamiento elástico y una deformación ϵ_z en la dirección de la carga aplicada (la cual tomamos arbitrariamente como la dirección z). Como resultado de este alargamiento se producirán constricciones en las direcciones laterales (x e y) perpendiculares a la dirección de la aplicación de la tensión. A partir de estas contracciones, se pueden determinar las deformaciones de compresión ϵ_x y ϵ_y . El cociente entre las deformaciones laterales y axiales es el coeficiente de Poisson [12]:

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (5)$$

El signo negativo se incluye en la expresión para que “ ν ” sea siempre positivo, puesto que ϵ_x y ϵ_y siempre son de signo opuesto.

La relación de estos tres factores (E, ρ , ν) con la velocidad del sonido es la siguiente [15]:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (6)$$

Donde:

V = Velocidad de la onda

E = Módulo de Young

ρ = Densidad

ν = Coeficiente de Poisson

2.3.1 Refracción, reflexión e interferencias

El sonido avanza en línea recta cuando se desplaza en un medio de densidad uniforme. Sin embargo, igual que la luz, el sonido está sometido a la refracción, es decir, la desviación de las ondas de sonido de su trayectoria original. En las regiones polares, por ejemplo, donde el aire situado cerca del suelo es más frío que el de las capas más altas, una onda de sonido ascendente que entra en la región más caliente, donde el sonido avanza a más velocidad, se desvía hacia abajo por la refracción. La excelente recepción del sonido a favor del viento y la mala recepción en contra del viento también se deben a la refracción. La velocidad del aire suele ser mayor en las alturas que cerca del suelo; una onda de sonido ascendente que avanza a favor del viento se desvía hacia el suelo, mientras que una onda similar que se mueve en contra del viento se desvía hacia arriba, por encima de la persona que escucha.

El sonido también se ve afectado por la reflexión, y cumple la ley fundamental de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Un eco es el resultado de la reflexión del sonido. El sonar se basa en la reflexión de los sonidos propagados en agua. Una bocina es un tubo cónico que forma un haz de ondas de sonido reflejando algunos de los rayos divergentes en los lados del tubo. Un tubo similar puede recoger ondas de sonido si se dirige el extremo ancho hacia la fuente de sonido.

El sonido también experimenta difracción e interferencia. Si el sonido de una única fuente llega a un oyente por dos trayectorias diferentes (por ejemplo, una directa y otra reflejada), los dos sonidos pueden reforzarse; sin embargo, si están fuera de fase pueden interferir de forma que el sonido resultante sea menos intenso que el sonido directo sin reflexión.

Las trayectorias de interferencia son distintas para sonidos de diferentes frecuencias, con lo que la interferencia produce distorsión en sonidos complejos.

Dos sonidos de distintas frecuencias pueden combinarse para producir un tercer sonido cuya frecuencia es igual a la suma o diferencia de las dos frecuencias originales [26].

Las vibraciones ultrasónicas tienen las siguientes características [13]:

- ☐ Viajan largas distancias en materiales sólidos
- ☐ Viajan en haces de sonido bien definidos
- ☐ Su velocidad es constante en materiales homogéneos
- ☐ Las ondas de vibración son reflejadas en interfases donde las propiedades físicas y elásticas cambian.
- ☐ Las ondas de vibración pueden cambiar su modo de vibración o estar sometidas a la conversión del modo en interfases del material.

2.3.2 Atenuación

La atenuación es la pérdida progresiva de la energía de la señal ultrasónica. A medida que el haz ultrasónico viaja dentro del material, va perdiendo energía debido a la resistencia que opone la estructura del material. Como consecuencia, en la técnica pulso-eco, el pico correspondiente a la reflexión en la superficie posterior será cada vez de una amplitud menor a medida que la onda realiza viajes de ida y vuelta, tal como se observa en la Figura 2.4. La atenuación es un aspecto muy importante a tener en cuenta en materiales compuestos de matriz polimérica. A diferencia de materiales compuestos con matriz metálica, el ultrasonido es rápidamente atenuado por materiales poliméricos [14].

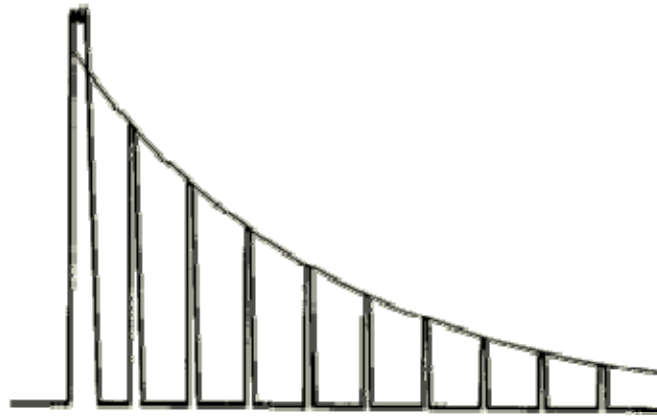


Figura 2.4. Atenuación de la señal ultrasónica [25]

El cambio de amplitud de una onda plana en decadencia viene dado por la siguiente expresión (7):

$$A = A_0 e^{-\alpha z} \quad (7)$$

En esta expresión, A_0 es la amplitud de la onda propagada no atenuada en alguna posición. La amplitud A es la amplitud reducida después de que la onda haya viajado una distancia z desde la posición inicial.

El número α es el llamado coeficiente de atenuación de la propagación de la onda en la dirección z . Las unidades de este coeficiente son neperes/metro (Np/m). Estas unidades se pueden convertir a decibelios/metro (dB/m) dividiendo por 0,1151. El decibelio es una unidad más común para relacionar las amplitudes de dos señales.

Generalmente, la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia del sonido. Los valores fijados de atenuación son a menudo proporcionados por una frecuencia individual, o un valor medio de atenuación de muchas frecuencias.

El valor actual del coeficiente de atenuación para un material dado depende en gran medida de la manera en la que se fabrica el material.

Por lo tanto, los valores dados de atenuación solo dan una vasta indicación de la atenuación y no deberían ser automáticamente contrastados.

Por lo general, obtener un valor fiable de la atenuación solo es posible determinando experimentalmente la atenuación para cada material. La atenuación se puede determinar evaluando las múltiples reflexiones de la superficie posterior interna. Se mide el número de decibelios entre dos señales adyacentes y este valor se divide por el intervalo de tiempo que hay entre las dos. Este cálculo da un coeficiente de atenuación en decibelios por unidad de tiempo, U_t . Este valor se puede convertir a nepers/longitud mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{0.1151}{v} U_t \quad (8)$$

Donde v es la velocidad en metros por segundo y U_t en decibelios por segundo [25].

Además del cambio en la velocidad, la temperatura puede también afectar a la cantidad de atenuación en algunos materiales. Los aparentes cambios en la atenuación pueden ser indicativos de cambios en la estructura del material. Por ejemplo, el acero endurecido puede manifestar menos atenuación que su homólogo no tratado. Podemos obtener datos valiosos acerca del material examinado observando los cambios repentinos que se producen en la amplitud de la señal. La microporosidad en el material puede afectar de la misma forma en la atenuación. Un material que muestra alta atenuación quizás requiere examinarlo usando frecuencias más bajas a causa del mayor tamaño de grano.

Para medios homogéneos las mediciones de atenuación deben corregirse tomando en cuenta la difracción que experimenta el haz ultrasónico cuando se propaga a través del material bajo examen [16]. Esta corrección debe incluir las pérdidas de energía que se producen en el medio empleado para acoplar la muestra al transductor.

También para medios no-homogéneos los mecanismos de dispersión son variados [17]. Esta puede ser causada por: (i) la presencia de las fronteras de la muestra (dispersión geométrica), (ii) la dependencia de las constantes del material, como por ejemplo, la densidad, los módulos elásticos, las constantes dieléctricas etc., de la frecuencia, (iii) dispersión de las ondas por inhomogeneidades finas densamente distribuidas en el material, (iv) la absorción o disipación de la energía de la onda en forma de calor u otro proceso irreversible, (v) la dependencia de la velocidad de la onda de la amplitud (dispersión no-lineal). Esta última forma de dispersión es propia de las ondas de gran amplitud y, en general, no se presenta en el caso de los ensayos no-destructivos. El fenómeno de la dispersión trae consigo una dependencia de las velocidades de propagación de una onda con la frecuencia, en estas circunstancias es necesario definir dos tipos de velocidades: la velocidad de fase que es la que tiene una onda monocromática desplazándose por el medio y la velocidad de grupo, que es la velocidad con que se propaga la envolvente de un paquete de ondas [18].

Igualmente la atenuación debida a absorción, dispersión o divergencia del haz hace que la señal de eco producida por una reflexión sea difícil de identificar en los casos en que, por su nivel o por la diferencia de impedancias acústicas entre el medio y la superficie reflectante, se confunde con rebotes espurios o no se distingue de la señal que conforma la zona ciega o zona muerta del transductor.

2.3.3 Notación para la atenuación y amplificación de las señales:

El poder acústico, medido en términos de vatios por metro cuadrado, es proporcional al cuadrado de la amplitud de la señal. La convención para los cambios de medida de la fuerza de la señal es la llamada notación decibélica. Si las intensidades de dos señales son I_1 e I_2 , la relación entre ellas se puede expresar como [25]:

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{N_F} \quad (9)$$

Por lo tanto,

$$N_F = \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (10)$$

Donde NB es el número de belios. El número de decibelios, NDB , es simplemente diez veces ese número:

$$N_B = 10 \log_{10} \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \quad (11)$$

2.3.4 Impedancia acústica

El sonido viaja a través del material bajo la influencia de la presión sonora. Como las moléculas o átomos de un sólido están unidos elásticamente, una presión excesiva se convierte en una onda propagándose a través del material.

La impedancia acústica es la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda ultrasónica. La impedancia acústica de un material (Z) se define como el producto de su densidad (ρ) por la velocidad acústica (V):

$$Z = \rho V \quad (12)$$

La impedancia acústica es importante para la determinación de la transmisión acústica y de la reflexión en el límite o frontera entre dos materiales que tienen diferentes impedancias. Es un aspecto importante para el diseño de transductores ultrasónicos. Y también para evaluar la absorción del sonido en un determinado medio [25].

2. 4 MATERIAL

2.4.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice (SiO₂), que se asocia a diversidad de óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado.

Los principales tipos de fibra de vidrio son:

- ❖ Vidrio E (eléctrico): representa prácticamente la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, mas del 90% de los refuerzos de uso general, y aporta buenas propiedades eléctricas.
- ❖ Vidrio A (alto contenido en álcali): es menos resistente y tiene un módulo de Young más bajo que el vidrio E. Por el contrario, presenta una gran resistencia química.
- ❖ Vidrio AR (álcali resistente): es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón, lo que le hace especialmente útil para la construcción.
- ❖ Vidrio C (químico): se sitúa en cuanto a propiedades a mitad de camino entre el vidrio A y el vidrio E, y se utiliza en las capas superficiales de estructuras anticorrosión, puesto que tiene alta resistencia química.
- ❖ Vidrio R o S (resistencia): empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (principalmente aeronáutica), tiene una gran resistencia a la tracción y un modulo de elasticidad superiores a otros tipos de vidrio.
- ❖ Vidrio D (dieléctrico): con sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en aplicaciones de componentes electrónicos.
- ❖ Vidrio B (boro): de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido álcali.
- ❖ Vidrio ERC (eléctrico y resistente químico): sus propiedades eléctricas combinadas con su resistencia química, hacen de este vidrio un material para aplicaciones eléctricas.
- ❖ Vidrio X: con base de óxido de litio por su transparencia a Rayos X.

Las propiedades más resaltantes de la fibra de vidrio en general son [11]:

- ❖ Alta adherencia fibra - matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- ❖ Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.

- ❖ Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tienen buena permeabilidad dieléctrica.
- ❖ Incombustibilidad
- ❖ Estabilidad dimensional. Bajo coeficiente de dilatación.
- ❖ Compatibilidad con materias orgánicas.
- ❖ Imputrescibilidad, no sufre alteración. Alta resistencia a la corrosión.
- ❖ Débil conductividad térmica.
- ❖ Excesiva flexibilidad.
- ❖ Bajo coste.

2.4.2 Propiedades del vidrio:

Propiedades físicas:

La característica más apreciada y notable de los vidrios es su transparencia, debida a que transmiten a su través el espectro visible, siendo las pérdidas por absorción tan sólo de un 10% para un vidrio ordinario de 2 mm de espesor o un cristal (vidrio de plomo) de 5 mm de espesor, puesto que los cristales tienen menos proporción de moléculas absorbentes (colorantes). La absorción de radiaciones no es idéntica para los de todas las longitudes de ondas, y así, los vidrios ordinarios son casi totalmente opacos, o sea, que absorben la totalidad de las radiaciones ultravioletas e infrarrojas.

El peso específico de los vidrios sodo-cálcicos ordinarios varía entre 2,25 y 2,50, pero puede llegar hasta 4,50 en los vidrios ricos en óxido de plomo, y 6,33 en los vidrios de bario más densos. Su coeficiente de dilatación cúbica varía entre $2,3 \times 10^{-5}$ y $2,7 \times 10^{-5}$. El coeficiente de conductividad crece al aumentar la temperatura y varía entre 0,00170 y 0,00310. Y el calor específico oscila entre 0,18 para los vidrios ordinarios sodo-cálcicos, y 0,239 para algunos tipos de vidrios especiales.

En la mayoría de los vidrios industriales, la dureza varía, según la escala de Mohs, entre 6 (la dureza del feldespato) y 7 (la dureza del cuarzo); pero llega a alcanzar en algunos vidrios especiales hasta 8 (la dureza del topacio) [19].

Propiedades mecánicas:

Las propiedades mecánicas del vidrio están muy influenciadas por su gran fragilidad, que es su defecto más pronunciado. Esta fragilidad se debe a que el vidrio no tiene zona plástica en su deformación, y cuando se rebasa el límite de elasticidad, se rompe. Por eso, a pesar de que hay vidrios con resistencias a la tracción superiores a los 300 Kg/mm^2 , no se hacen trabajar a más de 3 Kg/mm^2 , y a 60 Kg/mm^2 en compresión pura.

Otro defecto del vidrio es su extraordinaria sensibilidad a la entalla, es decir, a los cambios de forma, y sobre todo a los ángulos vivos, que deben evitarse en la conformación de las piezas de vidrio [19].

Propiedades químicas:

El vidrio es extraordinariamente estable y tiene una gran resistencia a la mayor parte de los compuestos químicos. De los ácidos, el único que le ataca fuertemente es el ácido fluorhídrico, que descompone toda clase de vidrios, formando con la sílice fluoruros gaseosos. Los agentes atmosféricos atacan al vidrio, pero muy lentamente.

Sin embargo las propiedades del vidrio, estirado en hilos delgados cambian considerablemente. A medida que el diámetro de las fibras disminuye, el vidrio, antes rígido, se vuelve flexible, y su resistencia, muy escasa inicialmente, aumenta con rapidez hasta sobrepasar a todas las demás fibras conocidas, siendo en esta forma que se usa como material de refuerzo.

Sus propiedades se hallan relacionadas con su composición y, por lo tanto, las variaciones cualitativas y cuantitativas de sus componentes influyen directamente sobre su curva de viscosidad en caliente, sobre su temperatura de fusión, su coeficiente de dilatación, su resistencia superficial y profunda al ataque de la humedad, sobre su resistencia química en general, etc. [19].

2.4.3 Matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio

Los materiales compuestos (composites) están diseñados para alcanzar la mejor combinación de las características de cada componente. La fibra de vidrio es mecánicamente resistente debido al vidrio, y flexible debido al polímero [12].

En un material compuesto, las fibras soportan los esfuerzos mecánicos y las resinas configuran la estructura final. Actualmente, el mercado de los materiales compuestos está formado principalmente por matrices orgánicas y diferentes tipos de fibra como vidrio E, vidrio R, carbono o aramida. Las más utilizadas son las fibras de vidrio E [1].

La matriz requiere resistencia a cortadura, tenacidad, resistencia a la humedad y al medio ambiente.

No es posible definir las propiedades genéricas de las resinas poliéster. Sin embargo, es posible saber qué características particulares tendrá una resina en función de sus constituyentes de base [1].

Las funciones generales de las matrices son las siguientes [20]:

- Transferir tensiones entre las diferentes fibras
- Proteger a las fibras de las condiciones medioambientales
- Proteger a las superficies de las fibras contra el desgaste
- Prevenir el pandeo de las fibras

Al contrario que los metales, los materiales compuestos son en algunos casos multilaminares, heterogéneos y anisótropos, tanto a escala macroscópica como microscópica y pueden tejerse para una aplicación particular [21].

Sin embargo los materiales compuestos también tienen algunos inconvenientes [11]:

- ♦ Existe la creencia de que no son duraderos
- ♦ No existe una tradición de diseño con estos materiales
- ♦ Las herramientas de cálculo no son tan conocidas ni están ampliamente extendidas como para los metales
- ♦ Falta información sobre su comportamiento
- ♦ El coste de la materia prima es elevado
- ♦ En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación
- ♦ El peligro de fuego puede ser mayor en ciertos materiales
- ♦ Los mecanismos de daño son más complejos

2.4.4 Inspección ultrasónica de materiales compuestos

El ultrasonido tiene una gran importancia en la inspección de materiales compuestos porque las ondas pueden atravesar grandes profundidades en el material, y al mismo tiempo, la técnica es bastante rápida y tiene un uso muy práctico y sencillo. Las dificultades inherentes aumentan, sin embargo, debido a las variaciones significativas de las propiedades mecánicas que se producen a lo largo de la profundidad o según la orientación.

La estructura del material puede afectar a la atenuación, velocidad y dirección de propagación de las ondas ultrasónicas.

Materiales tales como polímeros y materiales compuestos presentan frecuentemente una importante anisotropía y pueden ser bastante atenuantes.

La inspección ultrasónica de materiales con altos niveles de atenuación puede ser complicada. Una pieza que realmente es apropiada para la inspección, puede ocasionar impulsos reflejados de tal magnitud y dispersión, que es imposible determinar su calidad. Sabiendo que la velocidad de la onda de sonido es función de constantes elásticas, habrá una amplia variedad de posibles velocidades de onda en un material compuesto, incluso cuando el material está hecho de la misma matriz y fibra. Además, los composites, a menudo están hechos de capas, donde cada capa tiene una única orientación y distribución de la matriz [22].

Aunque la velocidad para cada uno de estos modos de propagación puede ser calculada, se requiere un conocimiento preciso de todos los parámetros, y estos datos no siempre están disponibles para la persona que realiza el ensayo. Parámetros como la densidad y la fuerza varían con procesos de aleación, tratamientos de calor, fundición, ondulado y forjado. En cambio, lo más normal es llevar a cabo una rutina llamada calibración durante el proceso de establecimiento de una inspección ultrasónica.

2.5 APLICACIONES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE VIDRIO:

La fibra de vidrio es la más producida en el mundo entre los distintos tipos de fibra con una producción anual de 1800000 toneladas [11]. Es uno de los refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos debido a sus características de bajo costo y sus buenas propiedades mecánicas, pero sobre todo por disponibilidad.

La utilización de materiales compuestos en aviones se ha incrementado de manera espectacular en los últimos 20 años. Los componentes ofrecen muchas ventajas sobre los materiales convencionales, especialmente cuando hay que tener muy en cuenta el peso [7].

La fibra de vidrio es de 2 a 6 veces más resistente que el acero y 3 veces más ligera. Es 5 veces más resistente que el aluminio y de densidades similares [11].

A mediados de los años 90 voló el AZOR (Figura 2.5), la primera aeronave liviana realizada íntegramente en compuesto diseñada y fabricada en España. El prototipo fue fabricado totalmente de fibra de vidrio con refuerzos de carbono y para los de serie la fibra de vidrio fue reemplazada por Kevlar con el objetivo de reducir el peso de la aeronave.

Los prepreg son ampliamente utilizados para construir piezas en la industria aeroespacial de alta performance y con geometría complicada. La mayoría de los prepreg están fabricados de resinas epoxis y reforzadas usualmente con fibras de vidrio, carbono y aramidas [23].



Figura 2.5. Aeronave “AZOR” [23]

En el Eurofighter Typhoon, un caza supersónico, se han empleado materiales compuestos de fibra de vidrio en las zonas que se muestran en la Figura 2.6.

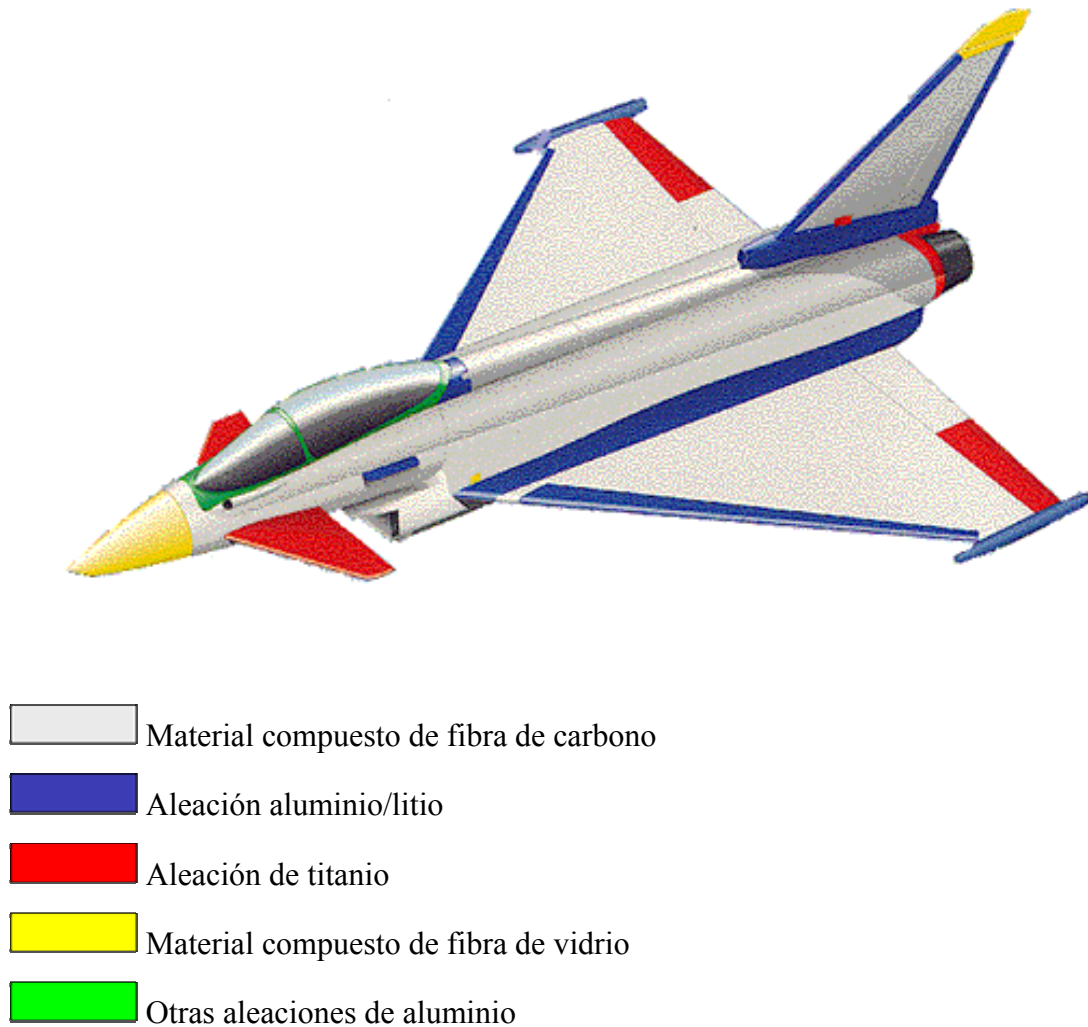


Figura 2.6. Materiales empleados en la construcción del Eurofighter Typhoon [11]

Entre las aplicaciones que tiene la fibra de vidrio con resina de poliéster se encuentra la fabricación de señales para vías de transporte terrestre, cascos de corredores de motociclismo, carrocerías de algunos modelos de coches, transporte marítimo, puentes, contenedores, elementos y componentes aeronáuticos, fachadas, señalización interna en pozos y galerías, en la industria de la construcción como paneles decorativos, coberturas, paneles de fachada, formas para concreto, silos para agricultura, componentes de casa prefabricadas, contenedores, tanques de combustible y muchas otras mas que no dejan duda de las cualidades de este tipo de material [11].

En la Figura 2.7 se aprecia un tanque de combustible subterráneo fabricado con fibra de vidrio y resina de poliéster.



Figura 2.7. Tanque subterráneo fabricado en fibra de vidrio con resina de poliéster [11]

Como aplicaciones náuticas, se utiliza para la construcción, mantenimiento y reparaciones de casco, equipos y accesorios de embarcaciones de recreo o militar, boyas, etc.

En la construcción, como aplicación no estructural tenemos un ejemplo en el revestimiento del techo en los túneles del metro de Madrid (vidrio/poliéster). [Figura 2.8]



Figura 2.8. Revestimiento del techo en el túnel de Madrid

3. ANTECEDENTES

3.1 ULTRASONIDO

En 1928, Sergei Y. Sokolov, científico ruso y conocido por muchos como el padre de los ensayos ultrasónicos, estudió el uso de ondas ultrasónicas para detectar defectos en objetos metálicos. Fue desarrollando su idea a finales de los años 20, en un tiempo en que no disponía de la tecnología requerida para ello. Demostró que las ondas de sonido se podían utilizar como una nueva forma de microscopio basándose en el principio de la reflexión. Sokolov pensó que un “microscopio” que usara ondas de sonido con una frecuencia de 3000 MHz tendría una resolución igual que un microscopio óptico. Sin embargo, hasta finales de los años 30, no se empezaron a desarrollar las tecnologías para tales mecanismos, y las altas frecuencias requeridas para el microscopio de Sokolov se empezaron a utilizar en sistemas ultrasónicos utilizados para radar y navegación submarina [32].

En 1931, Mulhauser obtuvo una patente para usar ondas ultrasónicas con el fin de detectar defectos en sólidos, para lo cual utilizó dos transductores. También se desarrollaron ensayos ultrasónicos por Firestone (1940) y Simons (1945) usando la técnica de eco-frecuencia.

3.2 APLICACIONES DEL ULTRASONIDO EN MATERIALES COMPUESTOS

Scarponi et al. [2] describieron la técnica de inspección no destructiva para la evaluación de delaminaciones en varios materiales compuestos. La metodología usada se basaba en un equipo de inspección ultrasónica que, mediante la reflexión de la señal, permitió determinar la posición de delaminaciones a lo largo del espesor y extensión de varios laminados.

El análisis fue realizado con un detector de fallas de Krautkramer, modelo USD 10, empleando dos transductores diferentes de 5 y 15 MHz para evaluar la importancia que tiene la elección de la frecuencia del transductor y obtener unos resultados fiables sobre las delaminaciones en los materiales compuestos.

La investigación fue desarrollada en dos fases posteriores: en la primera la mayor preocupación fue el mejor entendimiento de las capacidades del sistema y en la segunda fase se investigó el efecto de la atenuación acústica así como la influencia de la frecuencia del transductor en laminados gruesos.

De este modo, diferentes materiales fueron evaluados dependiendo del objetivo de la investigación: para la primera fase, materiales con baja atenuación y pequeño espesor que son típicos para aplicaciones aeroespaciales, como láminas delgadas y paneles “sándwich” de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) y CFRT. En la segunda fase, las inspecciones se realizaron en tejido de fibra de vidrio y sistemas de resinas de poliéster, y sistemas de tejido de kevlar y poliéster. Eran laminados gruesos con mayor atenuación como los adoptados para aplicaciones náutica, civil, etc. como G/Poliéster o K/Poliéster. Todas las muestras estaban hechas mediante tecnología RTM (moldeo por transferencia de resinas) y el espesor estaba comprendido entre 5 y 6 mm. En ambas fases, el daño interno fue obtenido mediante un test de impacto de baja velocidad.

La pantalla del USD-10 mostraba varios picos en la señal debidos a las superficies interlaminares. El primer y último pico corresponden a la superficie superior e inferior de la muestra respectivamente y además son los más altos.

Cuando aumenta una discontinuidad (por ejemplo cuando ocurre una delaminación) el pico correspondiente también crece debido a la alta reflexión de la onda ultrasónica.

Para cada material se requirió el instrumento de calibración para fijar la velocidad del sonido. Tal calibración fue desarrollada mediante el procedimiento de ecos múltiples (en este caso se necesita conocer el espesor de la muestra).

Para evaluar la precisión del instrumento se colocaron varios discos de teflón de 0.125 mm de espesor y 12.7 y 25.4 mm de diámetro dentro de una muestra de 150x150 mm en diferentes posiciones en el plano. Además para evaluar la respuesta de ecos múltiples se colocaron dos discos en la misma posición en el plano en diferentes interfases. Se encontró una muy buena respuesta entre los valores verdaderos y los medidos.

Fue posible evaluar correctamente tanto la posición como la extensión de tales defectos simulados.

Durante la primera fase, la evaluación no destructiva fue aplicada en varios programas de investigación sobre fatiga y tracción después de impacto en laminado oblicuo. En este último caso, la técnica fue útil para evaluar el creciente área de delaminación debido a la carga de tracción.

Para el laminado de G/polyester se utilizó un transductor de 15 MHz pero se obtuvieron resultados bastante pobres debido a la alta atenuación causada por un mayor espesor y por la presencia del vacío. Como consecuencia, se usaron dos transductores con diferentes frecuencias de trabajo (5 y 15 MHz) para evaluar el efecto que la frecuencia tiene en los resultados de la inspección.

Además se hizo necesario la señal de ecualización. Esto fue debido a que el material tenía una atenuación muy alta provocada tanto por las propiedades del material como por el espesor de la muestra.

En los resultados, es posible ver el buen comportamiento de la muestra de código KV, compuesta de fibra aramida y resina de poliéster, con un porcentaje de volumen de fibra del 63 %.

El buen comportamiento de esta muestra es debido a la forma de la fibra (que estaba en forma de tejido) y a un módulo de elasticidad más alto que los otros materiales. Sin embargo, el peor comportamiento fue el de la muestra de código ST (muestra de fibra de vidrio y resina de poliéster, con un porcentaje de volumen de fibra del 67%) para la cual la forma de fibra no era la adecuada y el material era vidrio.

Los resultados mostraron las buenas capacidades de la evaluación no destructiva por ultrasonido en términos de detección, localización y evaluación de delaminaciones.

El efecto de la atenuación acústica fue un aspecto importante a tener en cuenta sobre todo en las muestras de la segunda fase.

Se sabe que la atenuación depende de varios fenómenos como la absorción, pérdidas viscoelásticas y dispersión por pequeños objetos, superficies internas y efectos de fase del frente de onda debidos a la velocidad, índice de refracción, etc.

Debido a que las muestras se fabricaron mediante tecnología RTM, tenían una proporción de vacíos elevada. Esta presencia de vacíos en las muestras las hizo más sensibles al efecto de atenuación.

Esta metodología fue aplicada satisfactoriamente a un amplio rango de materiales compuestos, procesos de fabricación, espesores y factores de atenuación. Scarponi llegó a la conclusión de que la elección de la frecuencia del transductor tiene una gran importancia para la obtención de una buena resolución y exactitud de los resultados experimentales. Gran atención requiere también, según él, el uso de los instrumentos y su calibración, y es indispensable una gran destreza de la persona que realiza la inspección para obtener unos resultados fiables.

También en esta dirección investigaron Abdessalem Benammar et al.[3]. Realizaron una inspección de un laminado multi-capas de un polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) [Figura 3.1.] con 2 defectos de delaminación localizados en la superficie frontal y en la pared posterior.

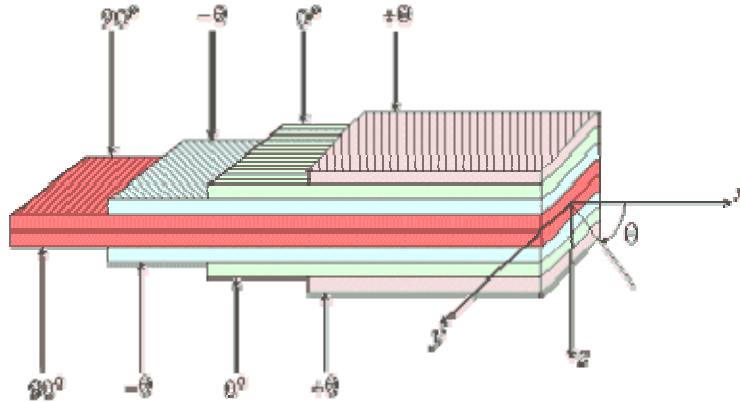


Figura 3.1. Laminado multi-capas

La muestra tenía un espesor de 3,15 mm y estaba constituida con la siguiente configuración: las capas unidireccionales estaban pegadas con epoxy, una capa en la otra alterando la orientación (0° , 45° , 0°). Cada capa era de 0,45 mm.

Los datos experimentales se obtuvieron utilizando un transductor de 2,25 MHz. El método utilizado para la detección y estimación de los ecos producidos por los defectos de delaminaciones fue una estimación de la señal del eco del defecto mediante algoritmo de expectación-maximización (EM). La profundidad a la que se encuentra la delaminación en el material depende de la velocidad del sonido en el material y de los parámetros t_d (posición en el tiempo del eco debido a la reflexión en la delaminación) y t_{FS} (posición en el tiempo del eco ultrasónico debido a la reflexión en la superficie frontal).

En el caso de la medida del espesor, se obtuvo una precisión inferior al 1% para la deconvolución mediante el algoritmo EM. En la localización del defecto se obtuvo una precisión del 28% y 8% para el defecto cercano a la superficie frontal y para el defecto cercano a la pared posterior respectivamente.

Nesvijski, de la Universidad Federal de Santa María (Brasil) [4], estudió diferentes aspectos de la técnica de evaluación no destructiva por ultrasonido para inspeccionar materiales compuestos.

Según Nesvijski, esta técnica es una parte fiable de una inspección factible de las propiedades físicas de los materiales compuestos. Considera, además, que el método ultrasónico ocupa un lugar destacado en el amplio rango de los diferentes métodos de evaluación no destructiva.

Los módulos de elasticidad son la característica más importante de un material compuesto. A diferencia de otras características de los sólidos, el módulo de elasticidad es muy sensible a las propiedades estructurales de los materiales compuestos.

Por ejemplo, para los compuestos de polímero, un ligero cambio de la composición de uno de sus componentes puede originar un considerable cambio de los módulos de elasticidad del material. Los métodos experimentales de estimación de módulos de elasticidad de diferentes estructuras de materiales compuestos (tanto ensayos destructivos, como no destructivos), dan una dispersión perceptible de los datos. La mayoría de investigadores intentan explicar este fenómeno alegando como posibles causas una instrumentación imperfecta o un procedimiento de inspección erróneo.

Además, varias teorías de sólidos, por ejemplo para policristales, describen las características elásticas como un rango de módulos [Figura 3.2]

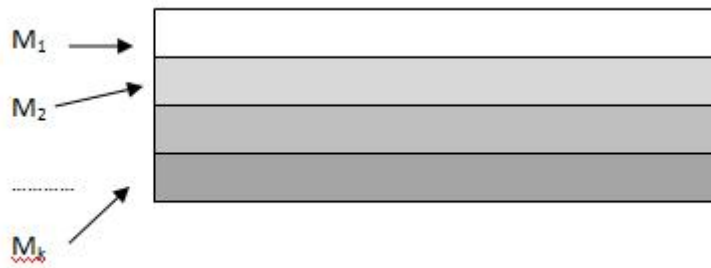


Figura 3.2. Esquema del material y sus módulos elásticos

Donde M es el módulo y $1, 2, \dots, k$ el número de componentes del material compuesto.

$$M^* = M_0 \pm \sum_{i=1}^k M_i U_i \quad (13)$$

Donde M_i es el módulo, U_i el coeficiente de peso e $i = 1, 2, \dots, k$

Nevisjki midió la velocidad ultrasónica en probetas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. El equipo ultrasónico con los transductores DPC (dry point contact), con los que no es necesario aplicar acoplante en la muestra, proporcionó las medidas de la velocidad ultrasónica.

Las estadísticas de los datos permitieron llegar a la conclusión de que el valor promedio general no es una característica estable del material, pero los datos de los límites superior e inferior diferencian bien dos tipos de material. Es posible concluir que las propiedades elásticas de la matriz pueden ser definidas por la función multidimensional donde los módulos de los componentes $M_1, 2, \dots, k$, forma, tamaño y porosidad, así como el coeficiente de Poisson efectivo, definen los límites superior e inferior de los módulos.

Los materiales compuestos de varios componentes pueden ser descritos por módulos elásticos efectivos. Sin embargo no pueden obtenerse valores promedio de los módulos efectivos, sólo se pueden estimar los límites superior e inferior de éstos módulos.

Un número de procedimientos estándar suponen la estimación del material usando valores promedio estadísticos de los datos ultrasónicos. Sin embargo, este enfoque no refleja las condiciones físicas de la caracterización de materiales compuestos y demanda mayor discusión e investigación.

B.R. Tittmann et al.[5], investigaron sobre la relación entre la atenuación ultrasónica y el grado de porosidad en materiales compuestos carbono-carbono. El propósito era deducir la porosidad del material realizando medidas de la atenuación ultrasónica. Para ello tomaron 4 muestras con distinto grado de porosidad. Previamente se midió su porosidad por medio de métodos destructivos para luego comparar resultados.

El ensayo se realizó por inmersión de la muestra en agua entre dos transductores de banda ancha con una amplitud de banda de 0,5 – 3,0 MHz.

Determinaron que la atenuación ultrasónica está relacionada con el número de dispersiones por unidad de volumen y con la dispersión total en la sección transversal de un obstáculo. Los resultados demuestran la viabilidad de la caracterización de la porosidad de materiales compuestos carbono-carbono de 2 dimensiones mediante inspección ultrasónica.

También respecto a la atenuación ultrasónica, pero en este caso en plásticos reforzados con partículas de distintos materiales, se realizó un estudio por S. Biwa et al.[6]., que utilizaron un procedimiento diferencial para analizar la atenuación de las ondas ultrasónicas longitudinales en materiales compuestos de polímero reforzados de partículas. Este procedimiento dio una colección de ecuaciones diferenciales para calcular el coeficiente de atenuación de la onda. Estas ecuaciones se obtuvieron a partir de las propiedades conocidas tanto de la matriz como de las partículas utilizadas para reforzarla. Para examinar este hallazgo teórico desde un punto de vista experimental, se midió la atenuación longitudinal en materiales compuestos de poliéster reforzado con partículas de vidrio, éstas de un radio de 0,0225 mm y en composites de epoxy reforzado con partículas de vidrio, donde las partículas en este caso tenían un radio de 0,150 mm. En los dos casos se emplearon muestras con diferentes proporciones de volumen que ocupan las partículas dentro del material. Las características de atenuación medidas fueron mostradas para respaldar las características de la predicción teórica.

Se demostró que el procedimiento diferencial predice la influencia que tienen tanto la frecuencia como la proporción de volumen que ocupan las partículas en el material, sobre la atenuación. Se demostró incluso que este procedimiento diferencial predecía esa dependencia en mejor concordancia con los resultados experimentales que el previo modelo de dispersión independiente.

Demostraron también que en polímeros reforzados con partículas de vidrio, las características de atenuación ultrasónica dependen sorprendentemente, de la relación longitud de onda – tamaño de partícula y de la concentración de partículas.

Llegaron a la conclusión de que cuando la longitud de onda es suficientemente grande comparada con el radio de la partícula, la pérdida viscoelástica predomina entre los distintos factores que afectan a la atenuación total en el material compuesto. Se demostró también que la atenuación del material decrece al aumentar la concentración de partículas. A medida que la longitud de onda se hace más pequeña, la pérdida de dispersión aumenta y la atenuación muestra dependencia no monótona de la concentración de partículas.

Tales hallazgos son considerados válidos en un sentido cualitativo para un tipo de materiales compuestos hechos de matriz viscoelástica y fases elásticas reforzadas.

Este modelo de predicción de la atenuación ultrasónica en varios composites de polímeros reforzados con partículas, contribuye a una mejor comprensión de la evaluación de materiales basada en la atenuación.

R. A. Kline [7] desarrolló una investigación en la que pretendía utilizar el análisis de la velocidad ultrasónica para la evaluación no destructiva de las propiedades mecánicas de laminados de materiales compuestos.

Buscaba una técnica certera, rápida, barata y compatible con la amplia variedad de sistemas o configuraciones de materiales compuestos empleados. Empleó un sistema electrónico para adquirir y procesar los datos. Para capturar las ondas ultrasónicas utilizó un digitalizador transitorio de alta velocidad de 100 MHz. El digitalizador estaba conectado directamente a un microordenador que controlaba la posición escaneada por el transductor y procesaba la información de la velocidad. Para mejorar la señal y distinguirla de la proporción de ruido, utilizó procedimientos de regulación de la señal (20 muestras para cada onda en cada posición).

En vez de un método no destructivo que diera sólo simples indicaciones cualitativas del defecto, su objetivo era el desarrollo de una técnica que pudiera ser cuantitativamente relacionada con las propiedades locales del material. Basándose en este criterio, se eligió el análisis de la velocidad ultrasónica utilizando múltiples trayectorias de onda como la técnica más apropiada para conocer estos objetivos.

Kline llegó a la conclusión de que este método no destructivo es rápido y se puede usar para inspeccionar paneles de materiales compuestos con el fin de evaluar diferencias locales en las propiedades del material y en su composición. Se pueden examinar tanto materiales reforzados unidireccionalmente como laminados reforzados en diferentes orientaciones.

Con los resultados obtenidos de la inspección se puede determinar directamente todos los módulos elásticos pertinentes de paneles de materiales compuestos. Usando los modelos de micromecanismos adecuados, se pueden extender para dar una medida de la composición local de la muestra.

En cuanto a la medición de la velocidad ultrasónica en los materiales, la norma ASTM E 494-95 [24], contiene los distintos procedimientos de inspección para ello. Esta norma cubre un procedimiento de inspección para medir velocidades ultrasónicas en los materiales con un equipo ultrasónico detector de fallas mediante la técnica pulso-eco, en el cual los resultados se visualizan en una presentación tipo A-SCAN. Se describe un método para determinar las velocidades ultrasónicas de un material desconocidas mediante medidas de comparación con un material de referencia del que se conocen sus velocidades.

La norma recoge las utilidades de la medición de la velocidad ultrasónica. Es útil para determinar varias propiedades importantes del material. Se puede determinar el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, impedancia acústica, y otras propiedades y coeficientes útiles de materiales sólidos si se conoce la densidad de dichos materiales.

Se recogen los procedimientos para medir tanto la velocidad de la onda longitudinal como la velocidad de la onda transversal. El procedimiento consiste en comparar el tiempo de viaje de la onda en el material desconocido con el tiempo de viaje de la onda en el material cuya velocidad se conoce. Se seleccionan las muestras con superficies planas paralelas y se mide el espesor con una precisión de ± 0.02 mm. A continuación se alinea el transductor sobre la muestra y se obtiene la señal. Utilizando la escala del eje de abscisas se mide la distancia entre el primer eco debido a la reflexión en la superficie posterior y el último eco que se puede distinguir claramente. Esto se hace tanto para el material conocido como para el desconocido. La onda ha atravesado entre cada eco una distancia que es dos veces el espesor de la muestra. Se cuentan el número de viajes de ida y vuelta desde el primer eco hasta el último en ambas muestras, que será el número de ecos menos uno.

Para calcular la velocidad desconocida (v_L) propone la siguiente fórmula (14):

$$V_L = \frac{A_k n_L t_L V_k}{A_L n_k t_k} \quad (14)$$

Donde:

A_k = Distancia del primer eco al eco número N en el material conocido, medido en la línea base del diagrama A-Scan (m)

n_L = Número de viajes de ida y vuelta de la onda en el material desconocido

t_L = Espesor del material desconocido (m)

V_k = Velocidad en el material conocido (m/s)

A_L = Distancia entre el primer eco y el eco número N en el material desconocido, medido en la línea base del diagrama A-Scan (m)

La norma proporciona también fórmulas para el cálculo de: coeficiente de Poisson, módulo de Young, impedancia acústica entre otros. Todas ellas en función de la velocidad ultrasónica longitudinal y de la velocidad ultrasónica transversal.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En esta sección se describen los materiales, equipos y procedimientos experimentales empleados en este trabajo.

4.1 MATERIAL

En este trabajo se ha empleado una estructura monolítica tipo laminado tejido, fabricado en fibra de vidrio tipo E reforzado con matriz de resina poliéster. Las propiedades mecánicas de este material se encuentran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades de la fibra de vidrio E [Referencia Libro]

Propiedades	Vidrio E
Diámetro del hilo (μm)	10 – 20
Densidad (Kg/m^3)	2580
Modulo de elasticidad (GPa)	72.5
Resistencia a tracción (GPa)	3.4
Coefficiente de dilatación térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)	5

4.2 PROBETA

Se utilizo una probeta de laminado grueso de fibra de vidrio cuadrada de 150 x 150 mm de área y 12 mm de espesor, tal como se muestra a continuación en la Figura 4.1.

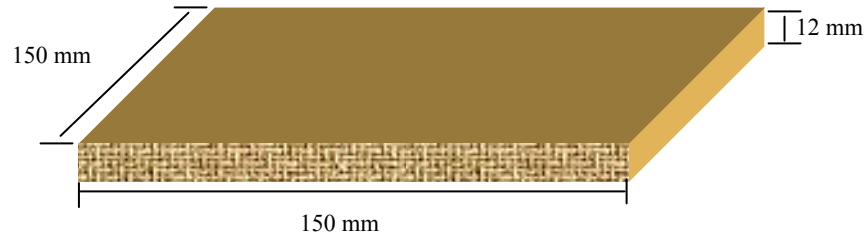


Figura 4.1. Esquema de la probeta inspeccionada

4.3 EQUIPOS

Las pruebas experimentales fueron realizadas utilizando para esto los siguientes equipos:

4.3.1 Equipo de ultrasonido USD10

El equipo de ultrasonido USD10 es un dispositivo que registra la señal de la onda ultrasónica recibida a través del transductor. Este equipo mide el tiempo que tarda la onda en atravesar el material. Por lo tanto, conociendo el tiempo y la velocidad, es posible calcular el espacio recorrido, y esto es lo que hace el equipo USD10. En este caso se quiere determinar la velocidad, por tanto se medirá el espesor de la muestra.

Es un sistema de visualización de la señal, en cuya pantalla muestra un gráfico en el que se representa en el eje de ordenadas la amplitud de la señal, y en el eje de abscisas el espacio recorrido. La Fig. 4.2 a continuación muestra el USD 10 utilizado en este proyecto.



Figura 4.2. Equipo ultrasónico Krautkramer Branson USD 10

4.3.1.1 Descripción del equipo

El equipo utilizado es el KRAUTKRAMER BRANSON USD 10, un equipo de control por ultrasonido, portátil y gobernado por un procesador, el cual se caracteriza por su gran versatilidad y a la vez de comodísimo manejo e independiente de la red. A pesar de su versatilidad de funciones, permite un acceso veloz y fácil a todos los parámetros.

El equipo tiene su parte frontal dividida en 2 partes: a la izquierda la pantalla digitalizada, y a la derecha las teclas. Debajo de la pantalla tenemos los enchufes donde se conectan los transductores.

El equipo consta de un menú que contiene varios títulos bajo los cuales se ordenan grupos de funciones en forma de tablas. Si se mueve el marcador con la tecla del cursor, se selecciona el título correspondiente.

4.3.2 Transductores ultrasónicos

El transductor es el medio por el cual la energía eléctrica se convierte en energía mecánica (ondas sonoras) o viceversa. Opera debido al efecto piezoeléctrico, el cual consiste en que ciertos cristales cuando se tensionan, se polarizan eléctricamente y generan voltaje eléctrico entre las superficies opuestas. Esto es reversible en el sentido de que al aplicar un voltaje a través las caras de un cristal, se produce una deformación del mismo. Este efecto microscópico se origina por las propiedades de simetría de algunos cristales

Se han empleado varios transductores de diferentes frecuencias y diámetros con el fin de establecer la frecuencia y diámetro óptimos para la inspección ultrasónica del material de fibra de vidrio.

Los transductores utilizados fueron los que se presentan a continuación en la Tabla 4.2, con sus respectivas características de diámetro y frecuencia central.

Tabla 4.2. Transductores ultrasónicos empleados

TRANSDUCTOR	DIAMETRO (pulgadas)	FRECUENCIA (MHz)
A	0.25	5
B	0.375	1.5
C	0.375	5
D	0.375	10

Los transductores empleados también pueden ser apreciados a continuación en la imagen mostrada en la Figura 4.3



Figura 4.3. Transductores utilizados

4.3.3 Medio acoplante

El medio acoplante es utilizado para mejorar la transmisión de ondas ultrasónicas entre el transductor y la placa de fibra de vidrio. En este caso fue utilizado Krautkramer GmbH & Co. oHG Hurth [Figura 4.4]



Figura 4.4. Líquido acoplante

4.3.4 Osciloscopio

Es posible obtener resultados más certeros con un equipamiento ultrasónico especializado, equipos auxiliares y técnicas especializadas. Uno de ellos es el osciloscopio [24]

Para la inspección asistida se empleó un osciloscopio digital Tektronis TDS 420A como el de la Figura 4.5.



Figura 4.5. Osciloscopio

La idea es en principio, conectar el equipo de ultrasonido en paralelo con el osciloscopio, de manera tal de obtener una señal digitalizada correspondiente a la interacción de la onda ultrasónica longitudinal con el material, analizar dicha señal de forma tal de obtener parámetros característicos del proceso.

4.4 PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACION

Para la caracterización simple se utilizó únicamente el equipo de ultrasonido USD 10, tal como se refleja en el esquema de la Figura 4.6

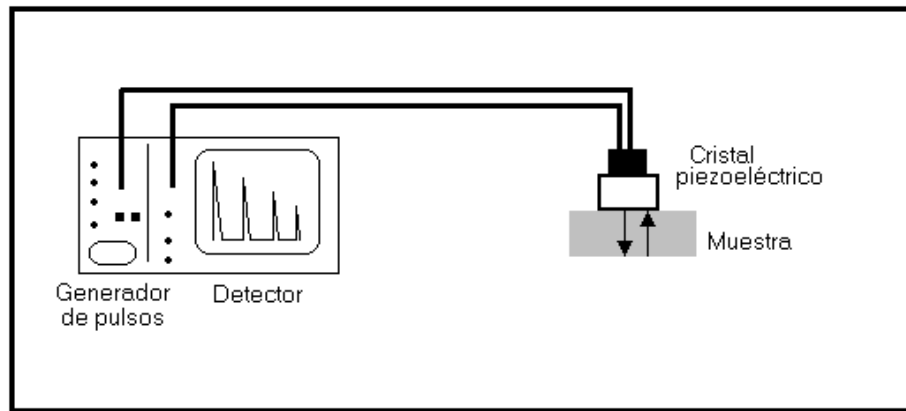


Figura 4.6. Esquema del método de medida de constantes elásticas mediante ultrasonidos.

4.4.1 Medida de la velocidad de la onda longitudinal

Existen diversas técnicas para medir las constantes elásticas de los sólidos. Una de estas técnicas consiste en estudiar la velocidad de propagación de ondas acústicas dentro del sólido (que viene determinada por las constantes elásticas del sólido). La figura 4.6 muestra esquemáticamente el método experimental utilizado para realizar las medidas.

Mediante un generador de señales se produce un pulso eléctrico. A continuación, un cristal piezoeléctrico convierte esta señal eléctrica en una señal acústica. Los pulsos que se utilizan tienen frecuencias superiores al umbral de detección del oído humano por lo que reciben el nombre de ultrasonidos. El cristal se acopla al sólido que se desea estudiar, de forma que la señal acústica pasa a propagarse a través del mismo. Para que la transmisión de la onda sea lo más efectiva posible, se utiliza una sustancia de acople entre el piezoeléctrico y la muestra. La señal atraviesa el sólido y se refleja parcialmente en su superficie, volviendo a la posición del piezoeléctrico y generando una señal eléctrica.

Posteriormente el pulso acústico se refleja parcialmente en la superficie del sólido y se va atenuando a medida que viaja a través del mismo.

Estas señales son recogidas por un equipo de detección que permite observar en pantalla los impulsos correspondientes a los “ecos” del pulso inicial. Para poder determinar las constantes elásticas es necesario medir la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales.

Para este estudio se aplicaron dos procedimientos experimentales específicos para medir la velocidad de propagación de la onda longitudinal ultrasónica en la placa de fibra de vidrio así como para estimar la atenuación del ultrasonido. Además se realizó una inspección de comprobación de procedimientos utilizando para ello un bloque de aluminio.

En el procedimiento de caracterización se siguieron las pautas establecidas en la norma ASTM E 494-95 para la medida de la velocidad ultrasónica en los materiales [24]. La velocidad puede ser medida determinando el tiempo de vuelo de la onda a través del espesor de la muestra. La velocidad es la distancia recorrida por la onda (que se corresponde al espesor) dividido por el tiempo que tarda la onda en recorrer esa distancia. En este método el mismo transductor envía la onda y la recibe. Para este caso aparecen una serie de reflexiones, para lo cual se utiliza la medición del tiempo de retardo entre las reflexiones adyacentes. Como se puede ver en el esquema de la Figura 4.7 la onda ultrasónica recorre una distancia igual a dos veces el espesor de la muestra.

Por tanto, la velocidad es igual a dos veces el espesor dividido por el tiempo:

$$C_L = \frac{2xd}{t} \quad (15)$$

Donde:

c_L Velocidad de la onda ultrasónica longitudinal

d espesor del material

t Tiempo que tarda en recorrer la onda el espesor e

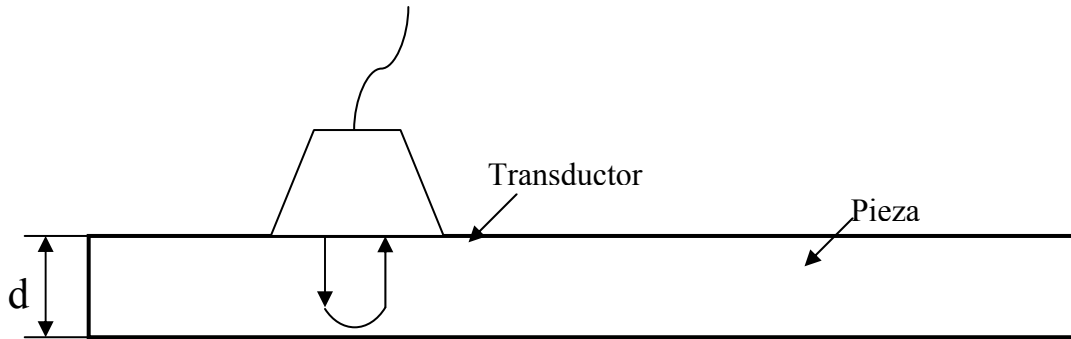


Figura 4.7. Esquema del recorrido de la onda a través del espesor de la muestra.

Cuando este esquema experimental es implementado, se observa en la pantalla del USD 10 una señal. Es un gráfico en el que en el eje de abscisas se encuentra la distancia recorrida por la onda y en el eje de ordenadas corresponde a la amplitud. En ella se deben ver siempre al menos dos reflexiones características. Una inicial debida a la superficie sobre la que se apoya el transductor y otra debida a la reflexión de la onda en la superficie posterior. Esta representación se puede apreciar en la Figura 4.8.

En vista de que el espesor del material es un dato conocido, se ajustó el equipo para conocer el tiempo empleado por la onda en hacer el recorrido de dicho espesor, esto es mostrado en la pantalla del equipo.

4.4.1.1 Procedimiento

La norma [24] establece que el procedimiento está previsto para materiales sólidos con un espesor mayor que 5 mm. El procedimiento que se siguió para determinar la velocidad ultrasónica de la onda fue el siguiente:

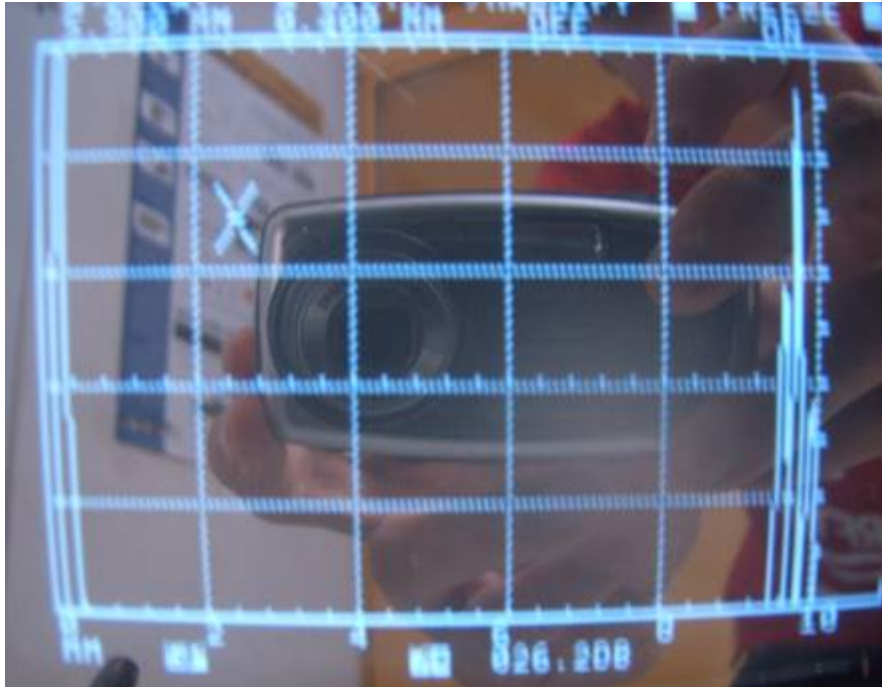


Figura 4.8. Señal con las reflexiones debidas al transductor y al eco de pared de fondo.

1. Preparar la muestra. Se comprobó la condición superficial de la probeta para evitar mediciones confusas (suciedad, polvo, nivel de rugosidad). Se colocó el laminado sobre una superficie fija y totalmente plana como se muestra en la Figura 4.9.
2. Medida del espesor de la probeta: Dado que el camino acústico que recorre la onda es uno de los datos necesarios para realizar la estimación de velocidad de la onda ultrasónica longitudinal, se requiere de un pie de rey para medir el espesor de la probeta y tomar nota de este valor, así mismo este dato debe ser comprobado en diferentes puntos de la placa a inspecciones, para así también evitar errores por imperfecciones en el proceso de fabricación del componente.
3. Encender el equipo. En esta fase es necesario verificar las conexiones y los cables, así como la buena alimentación del equipo.



Figura 4.9. Probeta lista para inspeccionar

4. Conectar el transductor al cable British Naval Connector (BNC) como el de la Figura 4.10 y éste al equipo ultrasónico como se muestra en la Figura 4.11.



Figura 4.10. Conector BNC



Figura 4.11. Proceso de inspección

5. Seleccionar en el equipo ultrasónico la frecuencia del transductor utilizado o la que más se aproxime, para ampliar el sistema de filtro del equipo. Ya que el equipo dispone de un controlador para abrir el paso del espectro de frecuencias característicos del transductor, es necesario para una óptima visualización seleccionar un intervalo frecuencial en el equipo que se ajuste a la frecuencia del transductor empleado para la inspección.
6. Medio acoplante. Aplicar una pequeña cantidad de acoplante en la zona que se va a inspeccionar para poder colocar el transductor a la superficie del material. Se extiende éste en una zona de un diámetro algo mayor que el del transductor como se muestra en la Figura 4.12. El líquido acoplante no debe ser dañino para el material [24].

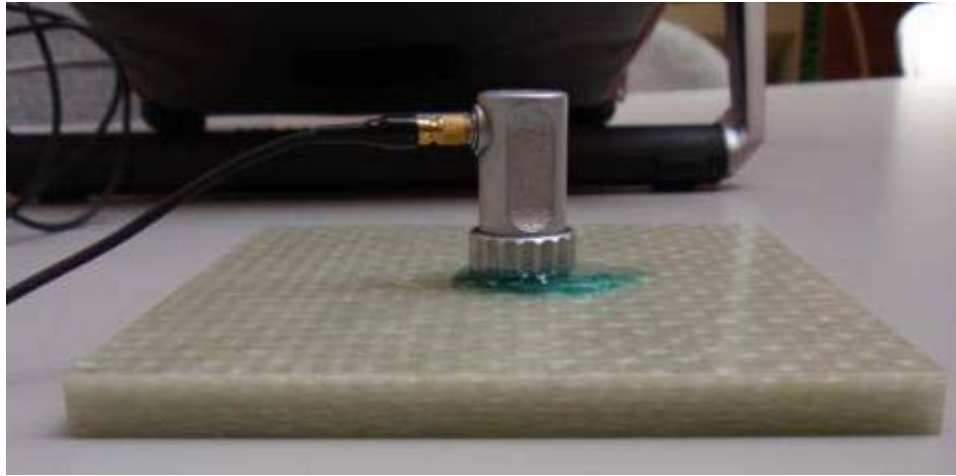


Figura 4.12. Aplicación del líquido acoplante

7. Colocar el transductor sobre la probeta y presionarlo ligeramente para que no se mueva durante la inspección y para que la onda se transmita al material con mayor facilidad y precisión.
8. Ajustar el control de retardo de forma que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla en la medida de lo posible.
9. Se varía la ganancia para ajustar la amplitud del primer eco de reflexión al 80% de la pantalla, con esto se aprovecha de observar la atenuación de la señal.
10. Introducir el valor de la distancia recorrida por la onda en esa primera reflexión y variar la velocidad ultrasónica hasta ubicar el eco de reflexión sobre el valor de la distancia introducido en el eje de abscisas.

Este procedimiento debe realizarse varias veces para disminuir el error experimental. El valor de velocidad correspondiente vendrá dado por el promedio de las velocidades medidas.

Se realizó la misma operación con los distintos tipos de transductores. Se debe tener cuidado al cambiar de transductor para no dañarlo con golpes, roces, etc. Los transductores se limpian con un paño y se guardan en su caja correspondiente recubierta con un material esponjoso.

También se deberá aplicar más cantidad de acoplante en el material si no queda suficiente, o si se va a colocar el transductor en otra zona.

Cada vez que se cambia de transductor, hay que volver a ajustar la frecuencia correspondiente en el equipo y realizar el proceso de calibración nuevamente.

4.4.2. Procedimiento para la medición de la atenuación ultrasónica

La atenuación de la señal ultrasónica se midió en términos cualitativos, comprobando la pérdida de energía de la onda ultrasónica, es decir, observando la disminución de la amplitud de la onda a medida que aumenta la distancia recorrida por ella.

El procedimiento para ello fue el siguiente:

1. Encender el equipo.
2. Conectar el transductor al cable British Naval Connector (BNC) como el de la Figura 4.10, y éste al equipo ultrasónico como se muestra en la Figura 4.11.
3. Seleccionar en el equipo ultrasónico la frecuencia del transductor utilizado o la que más se aproxime.
4. Aplicar una pequeña cantidad de acoplante en la zona que se va a inspeccionar.
5. Ajustar el control de retardo de forma que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla en la medida de lo posible.
6. Calibrar la distancia con los valores de velocidad obtenidos.
7. Colocar el transductor sobre la probeta y variar el rango de manera tal de obtener las reflexiones correspondientes a cada una de las laminas del laminado, en vista del grado de dificultad que implica esta parte del procedimiento, fue suficiente ajustar las reflexiones al espesor total del laminado.
8. Ajustar la altura del primer eco de reflexión al 80% de la pantalla.

9. Tomar nota de los valores relativos de altura de pantalla correspondientes a los siguientes ecos de reflexión, tal y como se muestra en la figura 4.13, con el fin de construir la gráfica de atenuación.

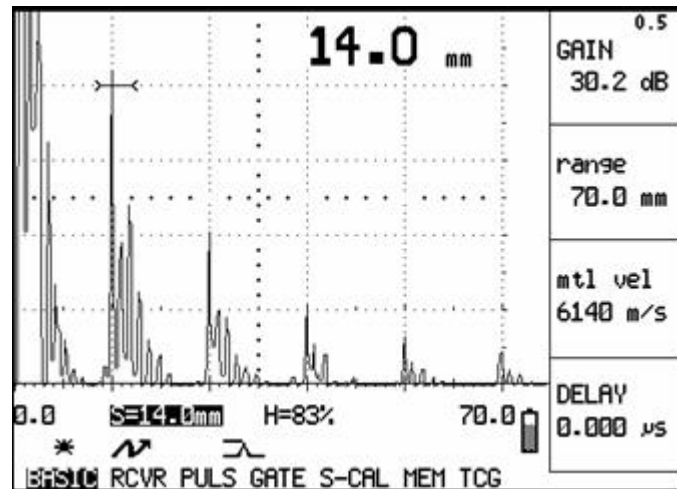


Figura 4.13. Sistema de referencia indicativo de la atenuación de la señal.

Se repitió el procedimiento con cada uno de los diferentes transductores en la misma probeta.

4.4.3 Método de comprobación del procedimiento

Con el fin de verificar que el sistema compuesto por el transductor, cable coaxial y el equipo USD10 funciona correctamente se utilizó un bloque de calibración de aluminio. Dado que son conocidos todos los datos de este bloque de referencia se utilizó para corroborar el procedimiento empleado sobre el laminado de material compuesto.

El aluminio se puede considerar un material homogéneo, en el cual el sonido se transmite con una velocidad constante de 6400 m/s a 20°C [29]. Por tanto se debe comprobar que ajustando esa velocidad, las reflexiones deberán coincidir con el espesor que se esté midiendo en ese momento. Para ello se midieron previamente las dimensiones del bloque con el pie de rey. Las dimensiones se muestran en la Figura 4.14. Se comprobó también la onda reflejada en el defecto, en este caso el orificio.

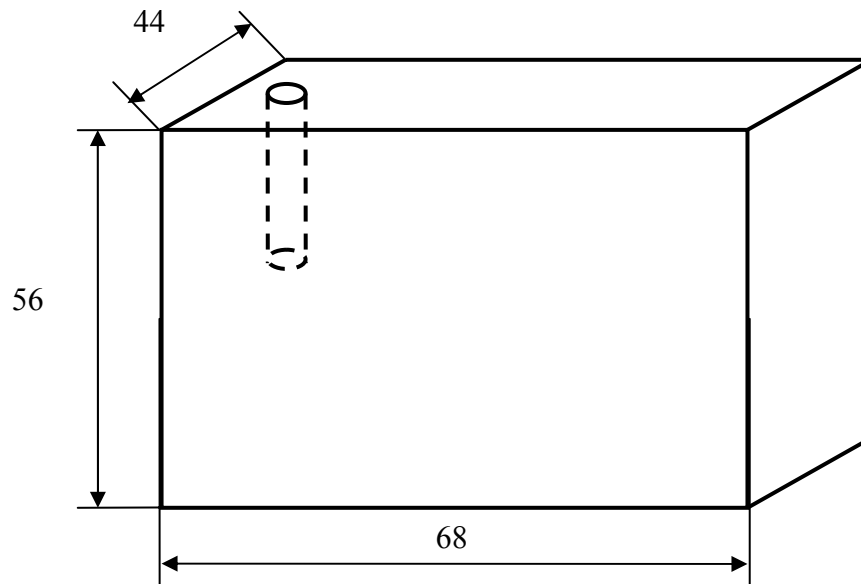


Figura 4.14. Bloque de aluminio

4.4.4 Caracterización asistida con el equipo de ultrasonido USD10 y el osciloscopio

Se utilizó un osciloscopio digital Tektronix con el fin de obtener los espectros de frecuencia de cada uno de los transductores sobre la muestra. Se siguió el siguiente procedimiento:

1. Encender el equipo.
2. Conectar el transductor al extremo del conector BNC en forma de T de la Figura 4.15. De los dos restantes extremos, uno se conecta al equipo de ultrasonido USD 10 y otro al osciloscopio.



Figura 4.15. Conector BNC en T

3. Seleccionar en el equipo ultrasónico la frecuencia del transductor utilizado o la que más se aproxime.
4. Encender el osciloscopio.
5. Aplicar una pequeña cantidad de acoplante en la zona que se va a inspeccionar.
6. Ajustar el control de retardo de forma que el pulso de salida del transductor quede fuera de la pantalla en la medida de lo posible.
7. Calibrar a distancia con los valores de velocidad obtenidos.
8. Ubicar en el osciloscopio una reflexión que tenga una buena definición, utilizando los controles de voltaje y tiempo de barrido de la señal.

La conexión de los equipos y el procedimiento de inspección para el caso de caracterización asistida con equipo ultrasónico y osciloscopio se muestran en la Figura 4.16 y se muestra un esquema de la conexión de los equipos en la Figura 4.17.



Figura 4.16. Procedimiento de inspección con el USD 10 y el osciloscopio.

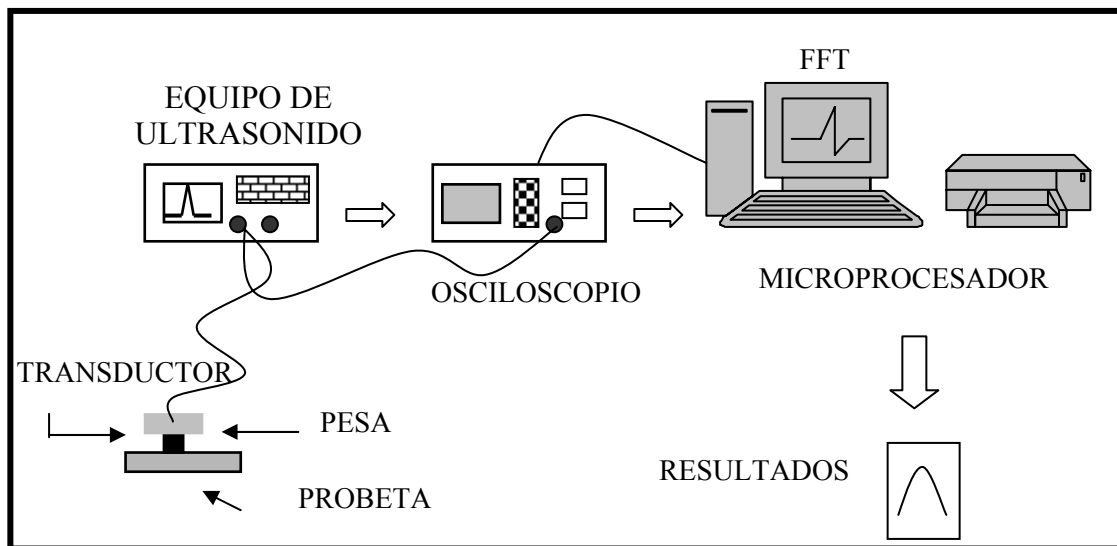


Figura 4.17. Esquema del procedimiento y la conexión de los equipos.

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de los diferentes procedimientos experimentales desarrollados en este trabajo.

5.1 MEDICION DE LA VELOCIDAD ULTRASONICA LONGITUDINAL

La medición de la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales en la placa de material compuesto de fibra de vidrio reforzado con matriz de resina de tipo poliéster, fue realizada tal y como se explico en la sección 4.4.1.

Para la medida de la velocidad de propagación se utilizó el desfase temporal existente entre la onda incidente y la onda que atravesaba la muestra de prueba. Este desfase era producido por el retardo que sufría la onda al atravesar el laminado de material compuesto, de forma que conocido su espesor (d) es inmediato obtener el valor de la velocidad a partir de la expresión (16):

$$C_L = \frac{2xd}{t} \quad (16)$$

Siendo C_L la velocidad de propagación de los ultrasonidos y “t” el intervalo temporal entre la onda incidente y recibida.

Los resultados obtenidos de las diferentes mediciones se muestran a continuación en la gráfica de la Figura 5.1.

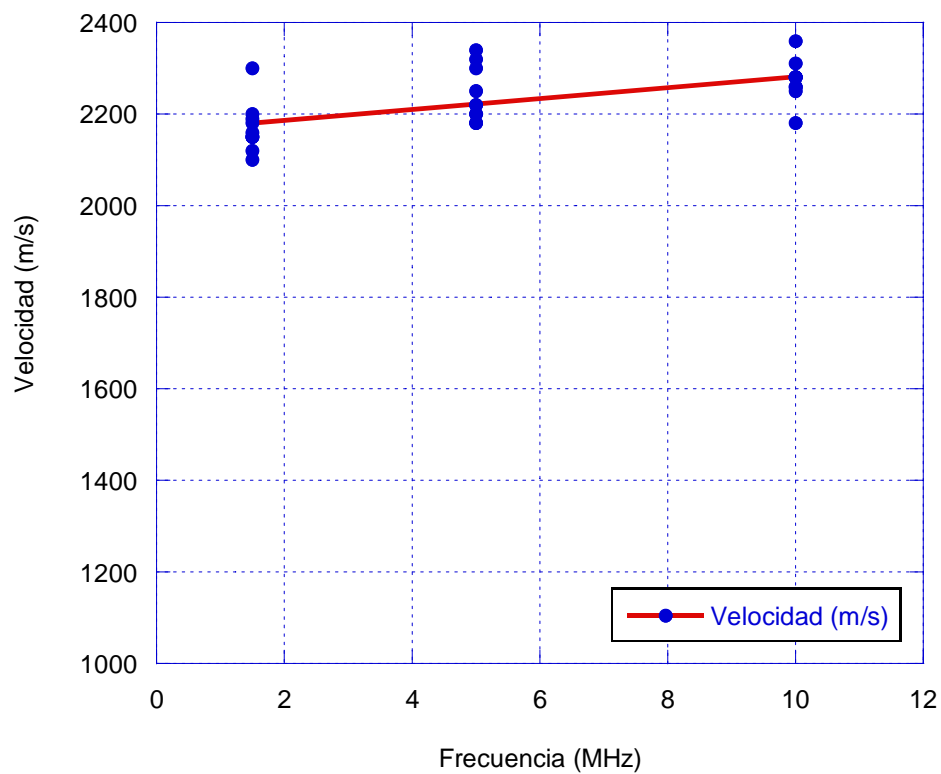


Figura 5.1 Curva de velocidad.

En total fueron tomados 10 mediciones para cada una de las frecuencias empleadas en este trabajo (1.5 MHz, 5 MHz y 10 MHz), lo que hace un total de 30 mediciones de velocidad.

El promedio de la velocidad obtenida para cada frecuencia empleada se puede observar a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Velocidades promedio obtenidas

Frecuencia del transductor (MHz)	Promedio de la velocidad ultrasónica obtenida (m/s)
1.5	2170
5	2241
10	2274

La grafica muestra una tendencia al incremento de la velocidad de la onda ultrasónica longitudinal en función del incremento de la frecuencia del transductor con el cual es medida, sin embargo se puede asumir también en una aproximación, la velocidad promedio de todas las mediciones, la cual equivale a 2228.33 m/s, considerando las variaciones presentes dentro del error experimental de la medición.

Una buena caracterización de velocidad permite una buena medición de espesor de materiales y de localización de discontinuidades, y en este estudio el valor de velocidad depende de las características del material y se ha considerado entonces independiente de las frecuencias utilizadas para dicha caracterización.

En principio se observo una influencia de la frecuencia con la velocidad de propagación de las ondas longitudinales, sin embargo en la literatura técnica fue posible conseguir datos experimentales sobre este material en específico, relacionados con pruebas de tracción, que permiten inferir el comportamiento elástico lineal del material y corrobora que las pequeñas variaciones presentadas en las mediciones obtenidas experimentalmente de velocidad se deben a errores experimentales.

Del ensayo a tracción realizado a un laminado de fibra de vidrio y matriz de poliéster, con las mismas características del material empleado para este estudio, fue posible obtener la siguiente gráfica tensión-deformación de la Figura 5.2 [33]. Como se puede observar la curva se puede aproximar de manera bastante acertada mediante una línea recta, es decir, se puede afirmar que existe una relación lineal entre la tensión y la deformación. La curva cumple la ley de Hooke (17):

$$\sigma = E \epsilon \quad (17)$$

Por lo tanto se puede afirmar que el módulo de elasticidad (E) se mantiene constante, y por tanto se puede considerar un valor promedio aproximado de velocidad, en vista de que el material se considera elástico lineal.

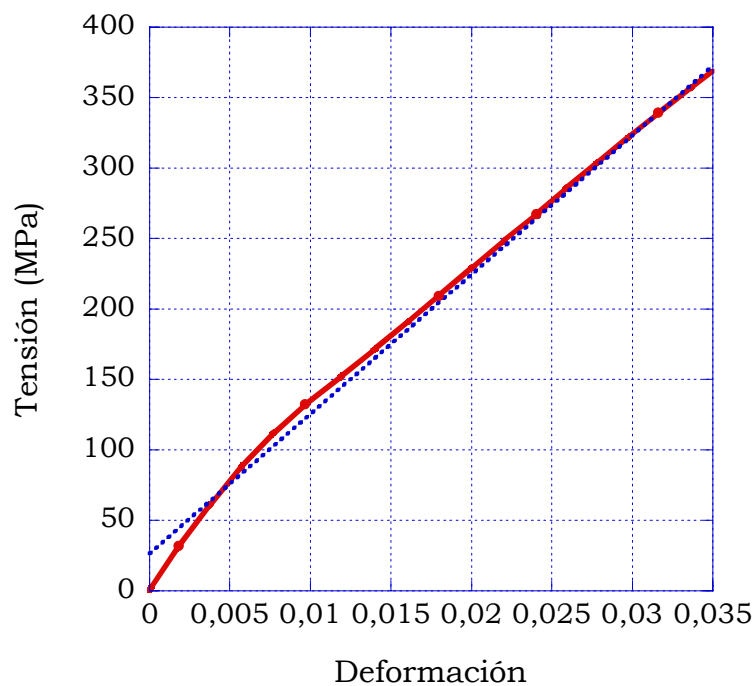


Figura 5.2 Ensayo a tracción de un laminado de fibra de vidrio y matriz de poliéster [33]

5.1.1 CALCULO TEORICO DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA ONDA LONGITUDINAL

A partir de la ecuación (18) es posible obtener teóricamente el valor de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica longitudinal en materiales isotrópicos:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (18)$$

Las propiedades para el laminado de fibra de vidrio E y matriz de resina de tipo poliéster, empleadas para la elaboración de los cálculos teóricos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Propiedades de la fibra de vidrio E [33]

Propiedades	Laminado de fibra de vidrio con matriz de resina poliéster
Densidad (kg/m ³)	1980
Modulo de elasticidad (GPa)	10.13
Coefficiente de Poisson	0,16

Aplicando la fórmula, se obtiene que el valor de la velocidad es de 2334.15 m/s. Experimentalmente se ha obtenido el valor medio de 2228.33 m/s. La diferencia entre estos dos valores se debe a la utilización, en la fórmula, de unos valores de densidad, modulo de elasticidad y coeficiente de Poisson teóricos dados para un material anisótropo, con las mismas características del material utilizado para el desarrollo experimental y las medidas tomadas experimentalmente.

5.1.1.1 Error experimental

Se procede a calcular el error experimental entre el valor promedio de la velocidad obtenida experimentalmente y el valor teórico.

$$E(\%) = \left| \frac{V_e - V_t}{V_t} \right| \times 100 = \left| \frac{2228.33 - 2334.15}{2334.15} \right| \times 100 = 4.53\%$$

Se obtiene un error experimental del 4.53% que se considera aceptable.

A continuación se calcula el error experimental entre cada uno de los valores de la velocidad medidos con las diferentes frecuencias. Los errores se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Errores experimentales entre valores medidos de velocidad

Valores de velocidad comparados	Error
Va = 2170 m/s y Vb = 2241 m/s	$E_1(\%) = \left \frac{V_a - V_b}{V_b} \right \times 100 = 3.17\%$
Va = 2170 m/s y Vc = 2274 m/s	$E_2(\%) = \left \frac{V_a - V_c}{V_c} \right \times 100 = 4.57\%$
Vb = 2241 m/s y Vc = 2274 m/s	$E_3(\%) = \left \frac{V_b - V_c}{V_c} \right \times 100 = 1.45\%$

El mayor error (E2) es de 4.57% que se considera aceptable considerando los errores experimentales cometidos. Y por tanto, los errores E1 y E3 que son menores también son aceptables.

5.2 CÁLCULO DE LAS LONGITUDES DE ONDA CARACTERÍSTICAS

En este apartado se calculan las longitudes de onda características para cada frecuencia y se estudia su relación con la atenuación que sufre la onda.

Las longitudes de onda se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (18)$$

Las longitudes de onda correspondientes para cada frecuencia, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.3. Longitudes de onda características de cada frecuencia

Frecuencia (MHz)	Velocidad (m/s)	Longitud de onda (mm)
1.5	2170	1.447
5	2241	0.448
10	2274	0.227

Como se puede comprobar, para frecuencias grandes, la longitud de onda es muy pequeña. Por tanto la onda se atenúa más porque intercepta más obstáculos que con una longitud de onda mayor. Y al contrario, para una frecuencia pequeña, la longitud de onda es grande y se atenúa menos. Este concepto se muestra en la Figura 5.3. Como se puede observar en la figura, con una longitud de onda relativamente grande, se pueden pasar por alto defectos u obstáculos. Sin embargo, con una longitud de onda menor, un defecto del mismo tamaño es interceptado por la onda.

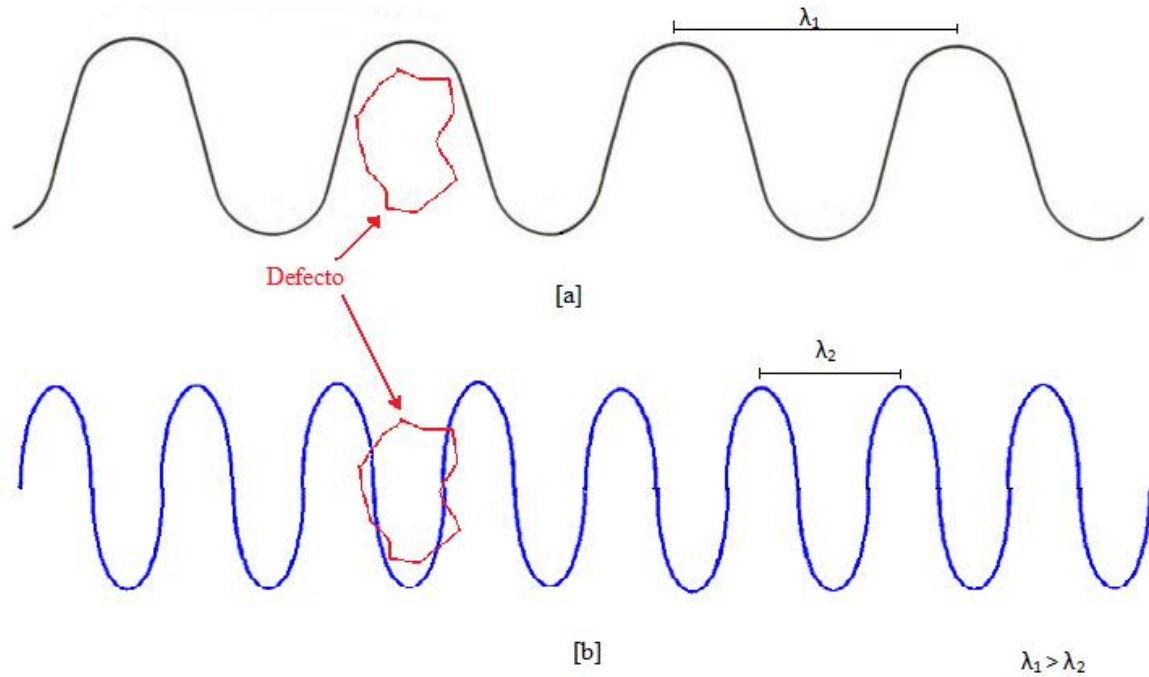


Figura 5.3. Relación entre la longitud de onda y la detección de obstáculos. [a] Longitud de onda λ_1 . [b] Longitud de onda λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$).

5.3 MEDICION DE LA ATENUACIÓN

Existen dos magnitudes importantes que caracterizan la propagación ultrasónica en un material. La primera es la velocidad de la onda ya sea de fase o de grupo, y la segunda es la atenuación, que manifiesta la pérdida de amplitud de la onda a su paso a través del material. En este caso se cumple una ley del tipo

$$A = A_0 e^{(-\alpha l)} \quad (19)$$

Donde:

A y A_0 : amplitudes final e inicial de una onda que atraviesa un material de longitud l , α es el coeficiente de atenuación, que caracteriza acústicamente al material (además de la velocidad).

Es importante señalar, cual es el mecanismo de atenuación en un material. Si se asume que se excita con un palpador de ondas planas dentro de un material, entonces el coeficiente α dependerá de los mecanismos de pérdida acústica que pueden existir en el mismo y que pueden tener un gran número de orígenes. En la práctica los palpadores presentan un patrón de radiación tal, que es una aproximación burda considerarlos como productores de ondas planas. Por tanto el mecanismo de atenuación geométrico no dependerá del material y podremos afirmar que se cumple la siguiente relación:

$$\alpha_{total} = \alpha_{geometrico} + \alpha_{material} \quad (20)$$

Las unidades de atenuación se dan en dB (o Neper) por unidad de longitud. En muchos casos se expresa una dependencia adicional con la frecuencia.

La medida de la pérdida de energía ultrasónica que experimentan las ondas longitudinales de ultrasonido al desplazarse en la placa de material compuesto de fibra de vidrio reforzado con matriz de resina de tipo poliéster, fueron obtenidas a partir de las mediciones realizadas con cada transductor a las diferentes frecuencias disponibles.

La estimación de atenuación se obtuvo directamente de la señal representada en la pantalla del equipo de ultrasonido.

Esta se llevó a cabo empleando transductores de frecuencias y diámetros diferentes, colocados aleatoriamente sobre la superficie de las probetas. Para ello se llevó y se mantuvo el primer eco de reflexión al 80% de la pantalla del equipo, observándose como los ecos sucesivos fueron perdiendo amplitud en la medida en que aparecieron diferentes reflexiones. Las señales típicas de cada frecuencia sobre los diferentes materiales de estudio fueron fotografiadas para poder graficar una imagen representativa de la atenuación de la señal, en vista de que por limitaciones del equipo fue imposible obtener una salida digital de la señal.

5.3.1 Transductor A (0,25" y 5 MHz)

La señal que se obtuvo empleando el transductor A de 0.25 pulgadas y 5 MHz se logró con una ganancia de 74.2 dB y es la que se muestra en las Figura 5.4. En la Figura 5.5 se muestra el esquema de esta señal para su mejor visualización.



Figura 5.4. Señal registrada para el transductor A.

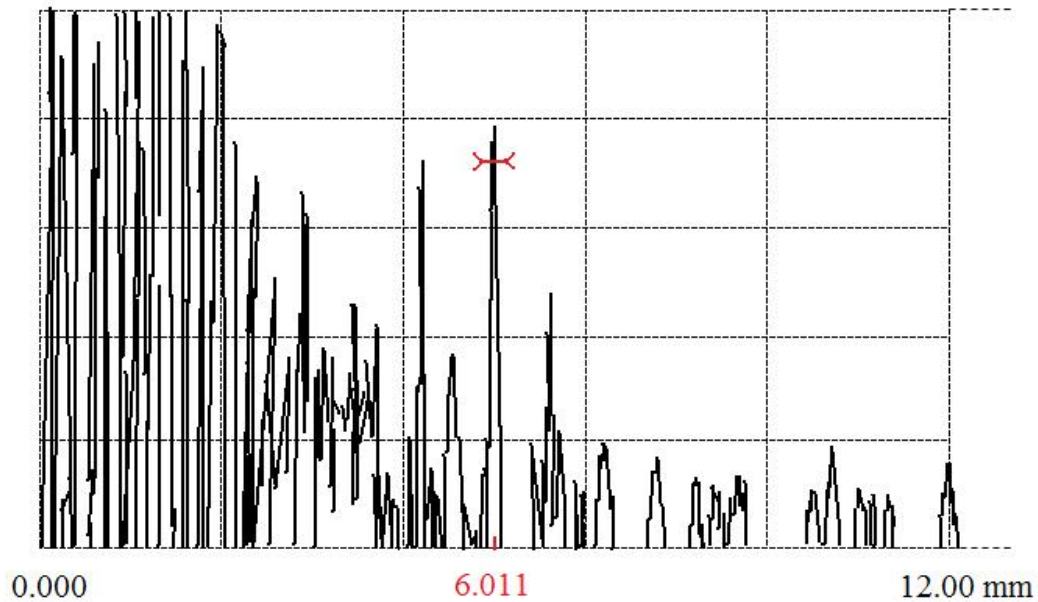


Figura 5.5. Esquema de la señal registrada para el transductor A.

Como se puede observar la onda sufre bastante atenuación a partir de los 6 mm del laminado. El eco de reflexión que se produce en la mitad del laminado se puede distinguir sin dificultad. Sin embargo es posible seguir viendo las reflexiones a partir de esta distancia aunque ya con menor energía. También es posible distinguir el eco de reflexión de la superficie posterior a los 12 mm, aunque con pequeñas dificultades ya que la onda pierde bastante energía en la mitad del laminado. Se puede apreciar también una gran cantidad de ruido inicial.

5.3.2 Transductor B (0.375" y 1,5 MHz)

Esta señal se obtuvo con una ganancia de 56 dB. Se pueden apreciar en las Figuras 5.6 y 5.7, las reflexiones correspondientes a 6 y 12 mm. Comparando con las demás frecuencias, esta es la que menos se atenúa, y por tanto la más adecuada para la inspección. Tiene la ventaja de que al ser la que menos se atenúa, se pueden apreciar los ecos de reflexión bastante bien.

Pero por el mismo motivo también se ve incrementando el ruido, lo que puede llevar a confusiones, por lo que se ha de tener especial cuidado para diferenciar el ruido de los ecos de reflexión característicos a los 6 y 12 mm.

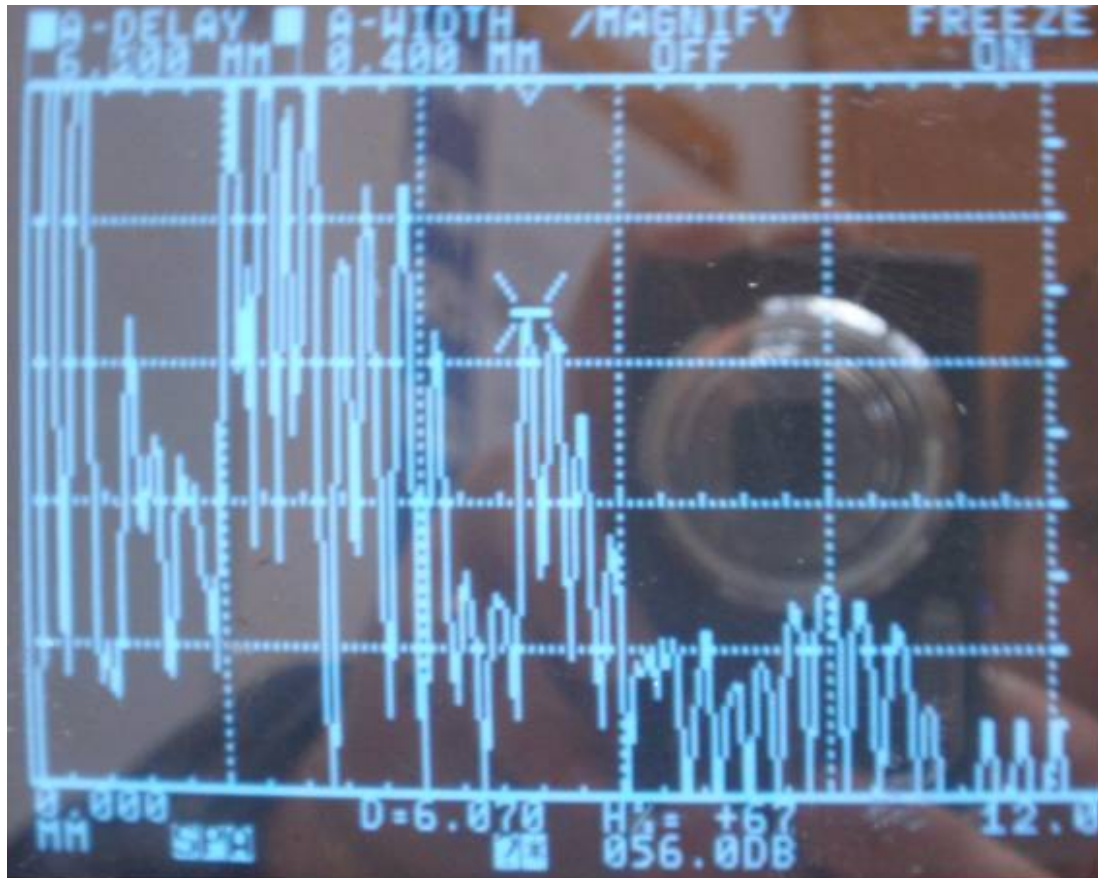


Figura 5.6. Señal registrada para el transductor B.

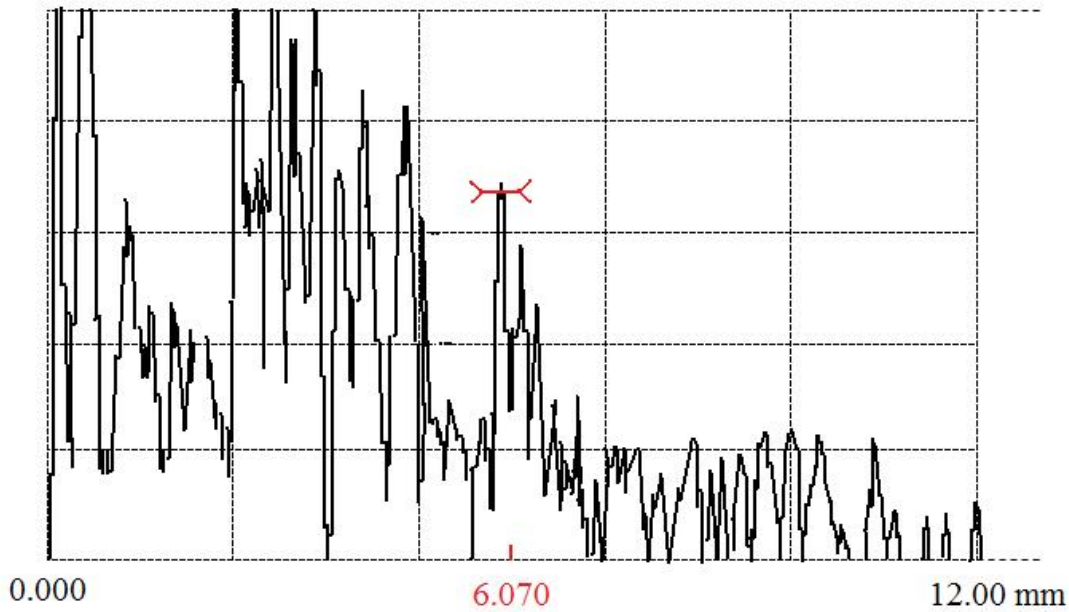


Figura 5.7. Esquema de la señal registrada para el transductor B.

Como se puede observar en el esquema de la Figura 5.7 se registra la señal a lo largo de todo el espesor, ya que la onda tiene mayor energía y la pérdida que se produce a los 6 mm no afecta tanto a la onda ultrasónica.

5.3.3 Transductor C (0.375" y 5 MHz)

Para lograr ver los ecos de reflexión con claridad fue necesario incrementar la ganancia hasta 70 dB. Se puede apreciar claramente en las Figuras 5.8 y 5.9, las reflexiones correspondientes al laminado de 6 mm y la reflexión o eco de pared de fondo a los 12 mm. Con esta frecuencia, la onda es capaz de atravesar los 6 mm del laminado, aunque no es la frecuencia que menos se atenúa.

Se puede apreciar con bastante claridad en la Figura 5.9 la reflexión a 6 mm, ya que esta frecuencia se atenúa un poco más que la del transductor B, lo que hace que disminuya el ruido evitando posibles confusiones. Sin embargo, también por esto resulta más difícil distinguir el eco de reflexión a los 12 mm, ya que la onda recorre un trayecto más largo.

Por este motivo, esta frecuencia intermedia de 5 MHz puede resultar muy útil para laminados de pequeño espesor, pero no tan beneficiosa para espesores mayores.

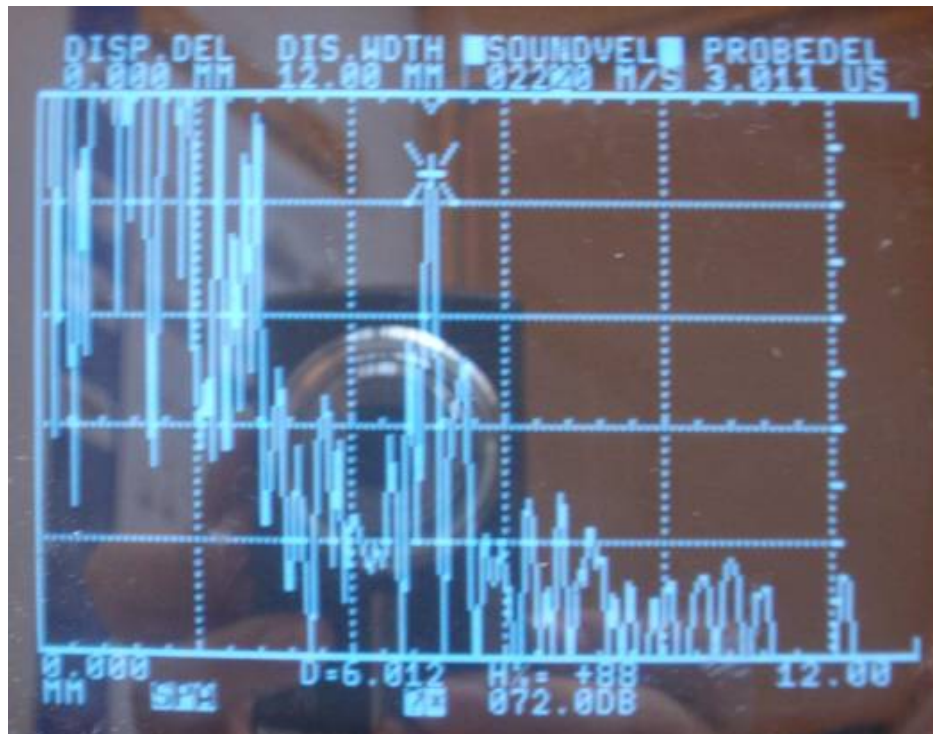


Figura 5.8. Señal registrada para el transductor C.

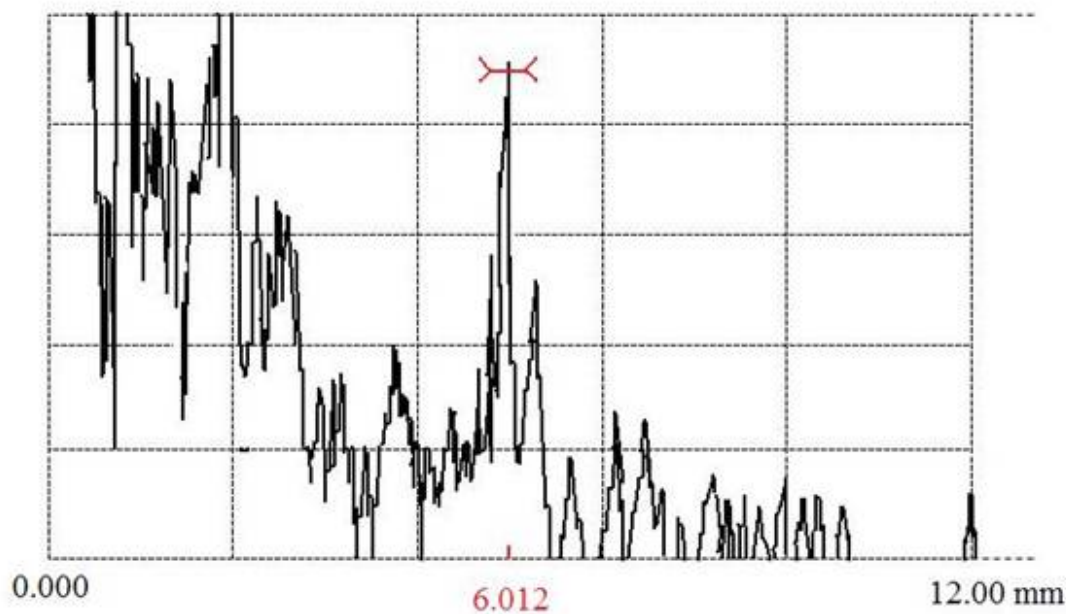


Figura 5.9. Esquema de la señal registrada para el transductor C.

Se pueden comparar con los resultados obtenidos con el transductor A, el cual tiene la misma frecuencia que el transductor de este apartado pero distinto diámetro. La señal sigue la misma estructura en cuanto a atenuación, por lo que se deduce que el diámetro del transductor no influye en la inspección de manera significativa.

5.3.4 Transductor D (0.375" y 10 MHz)

Con el transductor D solo se pudo ver señal hasta 6 mm, es decir, la mitad del laminado. A partir de 6 mm no se visualizó ningún eco de reflexión, tal como se observa en las Figuras 5.10 y 5.11. Esto es debido a la atenuación del material. Al comienzo se observa el ruido típico del cristal del transductor y de la parte superior de la probeta. Conforme va avanzando, la onda ultrasónica va disminuyendo su energía. Cuando llega a los 6 mm se produce la última reflexión significativa de la onda. Esto es debido a que a esta distancia (la mitad del laminado) tenemos una superficie interlaminar destacada y que absorbe bastante energía de la onda.

Esto se produce porque el laminado que se inspeccionó estaba construido por acoplamiento de 2 laminados de 6 mm de espesor cada uno. Por tanto, la onda ultrasónica se encuentra a 6 mm con una superficie más difícil de atravesar.

Debido a la gran atenuación que sufre la onda ultrasónica con la frecuencia de 10 MHz, se puede deducir que no muy apropiada para inspeccionar este laminado compuesto de fibra de vidrio y resina de tipo poliéster.



Figura 5.10. Señal registrada para el transductor D.

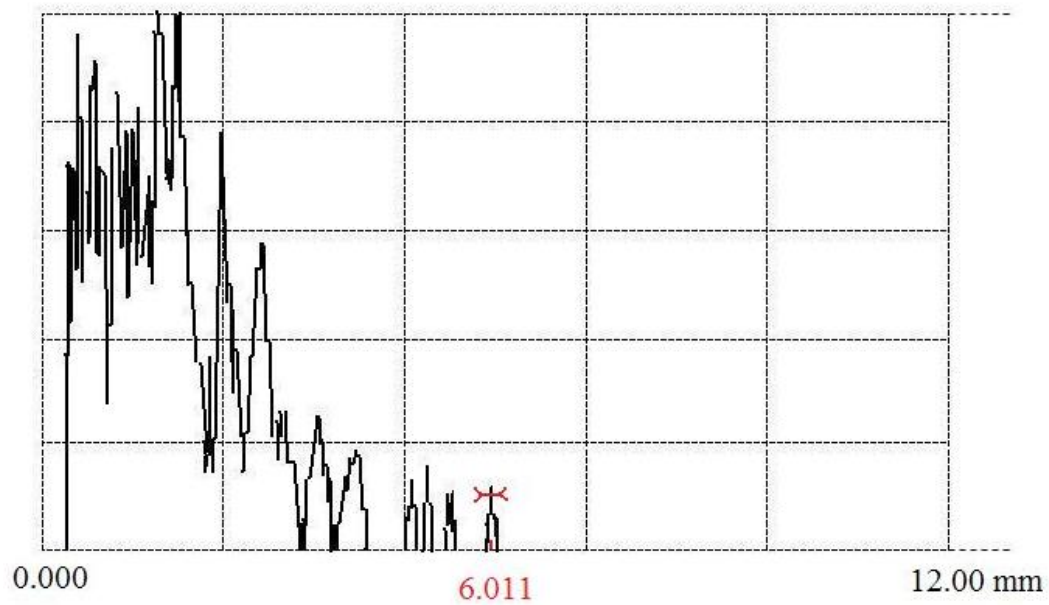


Figura 5.11. Esquema de la señal registrada para el transductor D.

De las gráficas obtenidas con cada uno de los transductores, se puede deducir que la atenuación es directamente proporcional a la frecuencia. Se produce una mayor pérdida de energía de la onda ultrasónica con ultrasonidos de mayor frecuencia.

5.4 SEÑALES OBTENIDAS DEL OSCILOSCOPIO

Los resultados obtenidos con el osciloscopio no fueron satisfactorios. Con ninguno de los distintos transductores fue posible distinguir el eco correspondiente a la superficie pared de fondo, ni el de la mitad del laminado. La señal mostraba una sucesión de múltiples reflexiones aleatorias a lo largo de todo el espesor, lo que impedía distinguir la reflexión correspondiente a la superficie. Sin embargo, es posible estudiar la atenuación para cada frecuencia, en función de la pérdida de energía de la onda ultrasónica. No obstante fue imposible aplicar la transformada de Fourier para conocer el espectro de frecuencias característico de la interacción de la onda con el laminado de material compuesto.

5.4.1 Transductor A (0,25" y 5 MHz)

Aunque no es la frecuencia que más se atenúa, se puede observar en la Figura 5.12 que la onda ultrasónica pierde bastante energía ya que la amplitud es pequeña si lo comparamos con la señal de la Figura 5.14 obtenida con el transductor C de la misma frecuencia.

La diferencia entre los dos transductores es el diámetro: El transductor A tiene un diámetro de 0.25 “, menor que el diámetro del transductor C (0.375 “). Al tener el diámetro más pequeño, el transductor tiene menos potencia y por tanto transmite menos energía.

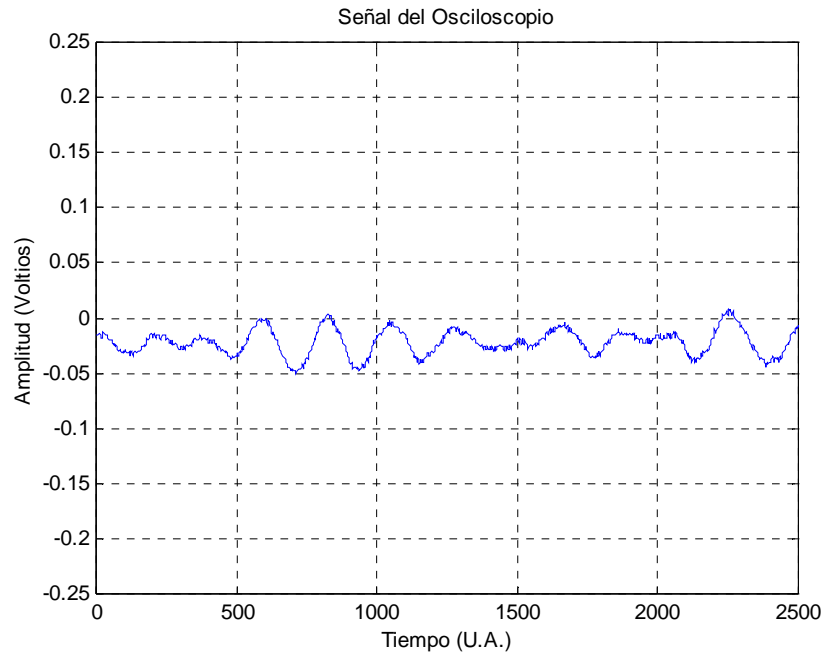


Figura 5.12. Señal obtenida en el osciloscopio con el transductor A.

La amplitud de la señal se mide en voltios, y para este caso, como se puede observar, la amplitud aproximadamente de 0.025 V, resultando en ocasiones una amplitud más pequeña.

5.4.2 Transductor B (0.375" y 1,5 MHz)

En la Figura 5.13 se puede observar que se obtienen amplitudes mayores, en algunos puntos, de hasta 0.05 V, el doble que la señal anterior. Es decir la onda ultrasónica viaja con más energía debido a que la atenuación es menor, por ser obtenida con el transductor de menor frecuencia.

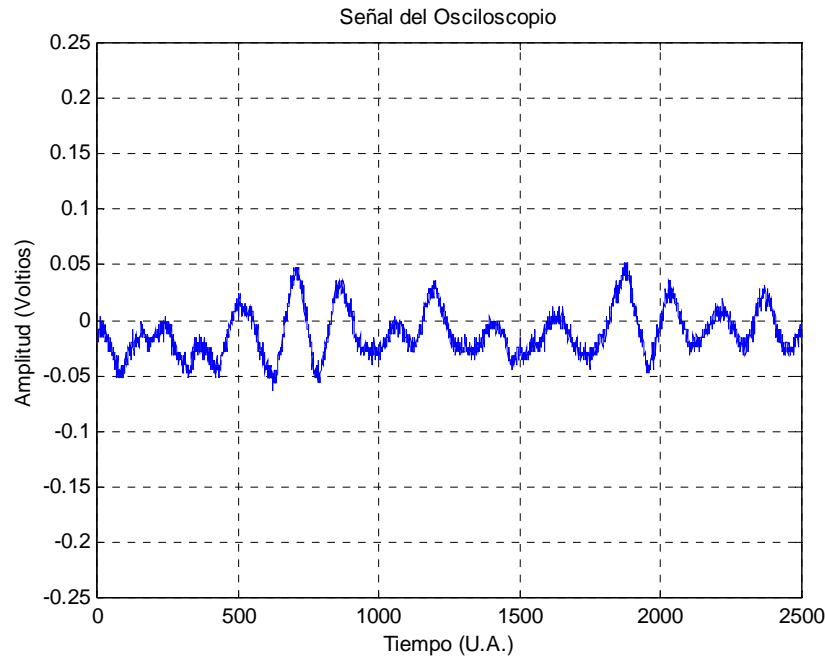


Figura 5.13. Señal obtenida en el osciloscopio con el transductor B.

No obstante en esta figura se observa también muy poca definición del pulso de ultrasonido, por lo que no se distingue claramente donde comienza y donde acaba el pulso ultrasónico.

5.4.3 Transductor C (0.375" y 5 MHz)

Como se puede observar en la Figura 5.14, se obtienen unos ecos de mayor amplitud a mitad de trayecto de la onda. Esto es debido a que el transductor tiene un diámetro mayor, es decir tiene más potencia y transmite más energía.

Sin embargo, los demás ecos tienen una amplitud de aproximadamente 0.025 V, como en el caso del transductor A, también de 5 MHz

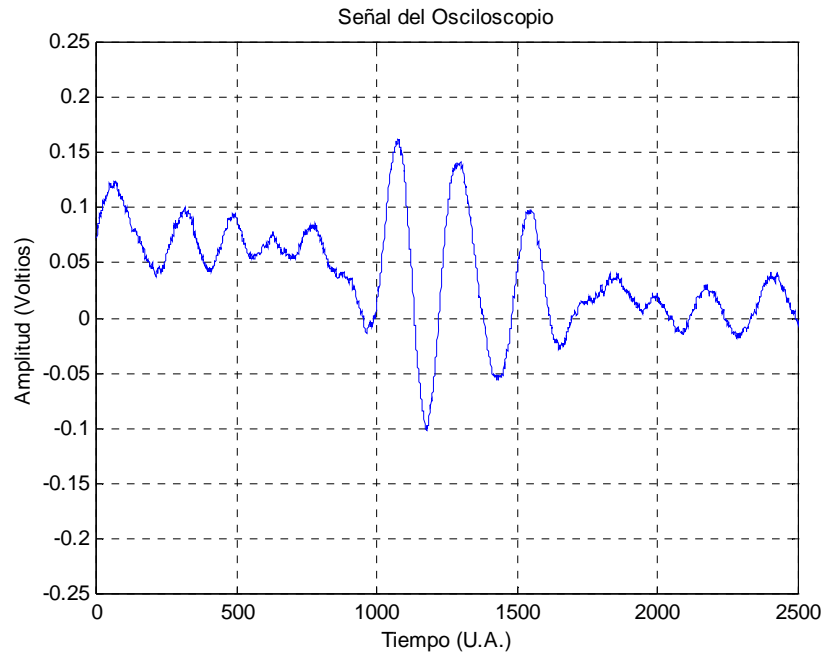


Figura 5.14. Señal obtenida en el osciloscopio con el transductor C.

En este caso, la definición del pulso ultrasónico es visiblemente mas clara que en los dos casos mostrados con anterioridad, sin embargo se observa mucho ruido en la señal aun cuando la amplitud es bastante aceptable.

5.4.4 Transductor D (0.375" y 10 MHz)

Como se puede observar en la Figura 5.15, los ecos de la onda son de muy poca amplitud. Solo en algún momento puntual la amplitud llega a 0.025 V. Por lo demás la media de amplitud es más pequeña. Comparando con las señales anteriores, ésta es la que más pérdida de energía tiene, por tanto es la frecuencia que más se atenúa

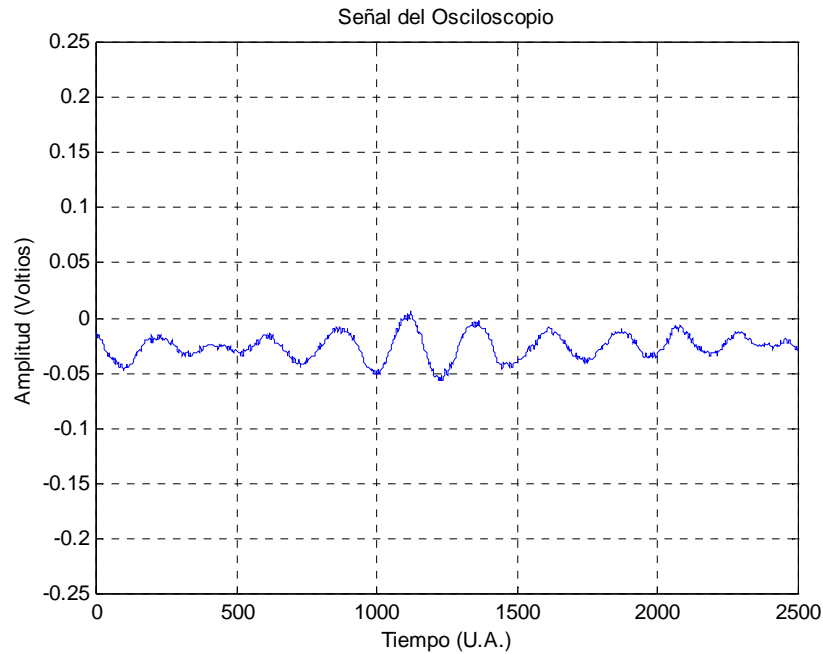


Figura 5.15. Señal obtenida en el osciloscopio con el transductor D.

El osciloscopio es un equipo que se utiliza para obtener unos datos más certeros y con más precisión. Es por esto que la señal queda agrandada y es posible ver la infinidad de reflexiones que anteriormente, sin osciloscopio, eran insignificantes.

Como se puede observar, los resultados obtenidos en cuanto a atenuación de la onda ultrasónica, se corresponden con los obtenidos utilizando únicamente el equipo USD 10 sin osciloscopio. Es decir, a mayor frecuencia de inspección, mayor atenuación sufre la onda ultrasónica.

6. CONCLUSIONES

Las señales ultrasónicas son ondas mecánicas de alta frecuencia adecuadas para monitorear in situ materiales que tienen geometrías diversas, permitiendo su caracterización cuando otros ensayos no son realizables. Las cantidades medidas, la velocidad de la onda que se propaga a través del material y la atenuación que sufre la misma, dependen de las propiedades mecánicas del material.

La técnica de inspección ultrasónica resulta más sencilla para inspeccionar materiales teóricamente homogéneos e isotrópos que para inspeccionar materiales compuestos, ya que éstos poseen una estructura anisótropa más complicada que produce reflexiones que se pueden confundir con las reflexiones características de las paredes o superficies interlaminares.

Se determinó experimentalmente que la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales en un laminado grueso de fibra de vidrio y matriz polimétrica es de 2228.33 m/s, así mismo, calculada teóricamente este valor alcanza los 2334.15 m/s.

En general, el laminado de fibra de vidrio presenta una fuerte atenuación. Sin embargo, ésta es mayor o menor en función de la frecuencia empleada. Se comprueba que a mayor frecuencia, mayor atenuación sufre la onda ultrasónica.

Por ello, la frecuencia óptima para inspeccionar el laminado de fibra de vidrio y matriz polimérica es 1.5 MHz, debido a que es la que menos se atenúa.

El hecho de que el laminado esté construido por superposición de dos laminados de 6 mm de espesor cada uno es un inconveniente a la hora de someterlo a una inspección ultrasónica, ya que la onda sufre una gran atenuación debido a este aspecto, y por tanto a partir de 6 mm pierde bastante energía, incluso se pierde totalmente para 10 MHz. Sin embargo, se puede utilizar este aspecto de una manera provechosa, fijándonos en el eco de reflexión producido a esa distancia, en vez del eco de la pared de fondo para determinar el valor de la velocidad ultrasónica.

7. TRABAJOS FUTUROS

Debido a la gran complejidad para estudiar materiales compuestos, se ha de profundizar y avanzar en el desarrollo de los métodos de inspección no destructivos, como el ensayo ultrasónico. Por todo esto se plantean a continuación trabajos futuros que deberán realizarse para mejorar el planteamiento propuesto en este desarrollo.

- Realizar una caracterización mecánica previa con el fin de establecer patrones de comparación de los resultados obtenidos experimentalmente.
- Desarrollar metodologías de inspección mediante técnicas de ensayo no destructivo por ultrasonido que permitan evaluar diferentes configuraciones de materiales compuestos.
- Una vez obtenidos los parámetros ultrasónicos característicos de los materiales compuestos (los de mayor uso) desarrollar patrones con discontinuidades típicas inherentes del proceso de fabricación (cavidades) y aquellas propias de su fase de servicio (deslaminación, rotura de matriz, rotura de fibra) a fin de proponer metodologías de inspección para cada caso.
- Evaluar el efecto que tiene la variación del diámetro del transductor en los parámetros acústicos y comparar la técnica empleada en este trabajo (pulso-eco) con otras técnicas que provean la misma información (Transmisión)

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Pablo Antequera. Los materiales compuestos de fibra de vidrio.
- [2]. C.Scarponi, G. Briotti. Ultrasonic technique for the evaluation of delaminations on CRFP, GFRP, KFRP composite materials.
- [3]. Abdessalem Benammar, Redouane Draï, Abderrezak Guessoum. Detection of delamination defects in CFRP materials using ultrasonic signal processing.
- [4]. Edouard G. Nesvijski. Some aspects of ultrasonic testing of composites.
- [5]. B.R Tittman, B. Hosten and M. Abdel-Gawad. Ultrasonic attenuation in carbon-carbon composites and the determination of porosity.
- [6]. S. Biwa, Y. Watanabe, S. Motogi, N. Ohno. Analysis of ultrasonic attenuation in particle-reinforced plastics by a differential scheme.
- [7]. R. A. Kline. Quantitative NDE of advanced composites using ultrasonic velocity measurements.
- [8]. ASM International. ASM Handbook, Formerly Ninth edition, Metals handbook, Volume 17: Nondestructive Evaluation and quality Control. EE.UU. (1.994)
- [9]. Gaete L, Y. Vargas Hernández, Pettorino A. Medida de los parámetros acústicos en sólidos II. Jornadas Iberoamericanas en Ultrasonido e Imagen Ultrasónica. España. (2001)
- [10]. Brenda Buitrago Pérez. Práctica nº 8: Inspección no destructiva. Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras de la Universidad Carlos III de Madrid.

- [11]. Brenda Buitrago Pérez. Apuntes.
- [12]. William D. Callister, Jr. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
- [13]. Paul. E. Mix. Introduction to Nondestructive Testing.
- [14]. Ken Ashbee. Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites.
- [15]. Hellier. Handbook of Nondestructive Evaluation.
- [16]. Papadakis E.P., Fowler K.A., Lynworth L.C. (1973), Ultrasonic attenuation by spectrum analysis of pulses in buffer rods: Method and diffraction correction, Journal of the Acoustical Society of America.
- [17]. Sachse W., Pao Y. On the determination of phase and group velocities of dispersive waves in solids. Journal Appl. Physics. Vol. 49. Nro. 8 (1978)
- [18]. Nicholson et al. 1996.
- [19]. Jose María Lasheras, Javier F. Carrasquilla. Ciencia de materiales. Segunda Edición.
- [20]. Departamento de construcciones arquitectónicas I.E.T.S de Arquitectura de Sevilla
- [21]. Antonio Miravete. Materiales compuestos. Tomo II.
- [22]. Don E. Bray and Roderic K. Stanley. Nondestructive Evaluation. A tool in Designe, Manufacturing and Service.
- [23]. Alejandra Rizzo, Gustavo Scarpin. Técnicas de procesamiento de materiales compuestos
- [24]. Norma ASTM E 494-95. Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials.
- [25]. www.ndt-ed.org
- [26]. http://www.fisicanet.com.ar/fisica/sonido/ap01_sonido.php

[27]. www.straplas.com.ar

[28]. www.larecovadelsur.com.ar

[29] www.wikipedia.es

[30] www.mnve.mil.ve

[31] Michael Berke. Krautkramer. Nondestructive Material Testing with Ultrasonics. Introduction to the Basic Principles.

[32] <http://www.ob-ultrasound.net/sokolov.html>

[33] S.K. García-Castillo, Tesis de Doctorado. Análisis de componentes estructurales de tipo laminado con tensión en su plano sometidos a cargas impulsivas. España 2007.